



Universidad
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

MEJORAS DE DISEÑO DE UN EMBRAGUE MAGNETORREOLÓGICO

Autor: Alberto Nieto Toledo

Tutor: Jesús Meneses Alonso

Leganés, Marzo de 2015



Título: Mejoras de Diseño de un Embrague Magnetorreológico

Autor: Alberto Nieto Toledo

Tutor: Jesús Meneses Alonso

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

El presente proyecto fin de carrera ha sido tutorado por el profesor D. Jesús Meneses Alonso, a quién me gustaría expresarle todo mi agradecimiento por haber prestado a mí y a mi proyecto todos sus conocimientos y dedicación. Quiero extender mi agradecimiento a la Universidad Carlos III de Madrid por haber dado la oportunidad de adentrarme en el increíble mundo de la ingeniería, permitiéndome evolucionar tanto en la faceta profesional como en la personal.

Por otra parte, quiero dejar constancia de las sensaciones que me ha dejado esta etapa inolvidable de mi vida: han sido cerca de siete años luchando desde el primer momento, cayendo y levantándome cada una de las veces que he encontrado un obstáculo en este duro camino. Todo este esfuerzo se ve recompensado al final de este difícil trayecto si me paro a pensar en las posibilidades que me brinda poseer este título y las enormes amistades que me llevo de esta etapa. No quería olvidar a estas últimas personas, gracias a mis compañeros de carrera por todos los momentos compartidos con ellos.

A todas aquellas personas que algún momento de esta etapa se ha interesado por mí.

A todas las personas que me han ayudado.

A mis amigos de toda la vida.

A mi hermana

A mis sobrinos

A mis padres, por el esfuerzo que han realizado, por creer siempre en mí, por enseñarme a luchar y mirar siempre hacia adelante, por prestarme una buena palabra en los malos momentos y una sonrisa en los buenos.

Una mención especial para mi padre que siempre ha mostrado una ilusión especial en que me convirtiera en Ingeniero Industrial.

Resumen

Este proyecto fin de carrera tiene como objetivo principal mejorar el diseño de un embrague magnetorreológico diseñado y fabricado por el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática para implementarlo en un mecanismo robótico con fines de rehabilitación. En concreto, este embrague tiene el propósito de ser utilizado en rehabilitación de personas con problemas de movilidad en las extremidades superiores, aunque en otros trabajos futuros también podrían ser estudiados para otras articulaciones humanas.

Los principales puntos de mejora de diseño en los cuales se centrará este proyecto serán solventar problemas relacionadas con la geometría del embrague y el dispositivo encargado de generar campo magnético para modificar las propiedades del fluido magnetorreológico.

Los problemas relacionados con la geometría del embrague se deben a que el actual diseño presenta fugas de fluido transmisor y dificulta su funcionamiento. Relacionado con estos cambios geométricos, se procederá a simplificar el diseño de este embrague lo máximo posible para cumplir los principales requisitos que debe cumplir un dispositivo destinado a los mencionados fines: funcional, sencillo, ligero, compacto y con mínimo consumo energético.

Por otra parte, se realizarán estudios de diferentes dispositivos con los cuales se genera el campo magnético necesario para cambiar la viscosidad del fluido y conseguir embragar y desembragar el dispositivo.

Para la realización del proyecto se hará uso de los programas informáticos PTC Creo 2.0, Ansys Maxwell, Matlab y SolidWorks.

Palabras clave:

Embrague, fluido magnetorreológico, diseño, esfuerzo cortante, límite de fluencia, campo magnético, solenoide, electroimanes, imanes permanentes.



Abstract

This project's main objective is to improve the design of a magnetorheological clutch designed and manufactured by the Department of Systems Engineering and Automation for rehabilitation. This clutch is intended to be used in rehabilitation of humans with mobility problems in the upper extremities, although other future designs will also be studied for other human joints.

The main points of improved design of this project will be overcome problems related to the geometry of the clutch and the device responsible for generating magnetic field to modify the properties of magnetorheological fluid.

Problems related to the geometry of the clutch are due to the current design is leaking transmission fluid and causes performance problems. Related to these geometric changes, will be simplified the design of this clutch as possible to meet the main requirements that must have a device for these purposes: functional, simple, lightweight, compact and minimum energy consumption.

Moreover, studies will be made with different devices for generating the necessary magnetic field. Applying this magnetic field will change the fluid viscosity and get engage and disengage the clutch.

Software PTC Creo 2.0, Ansys Maxwell, Matlab and SolidWorks will be used to complete the project.

Keywords:

Clutch, magnetorheological fluid, design, shear, stress, yield stress, magnetic field, solenoid, electromagnets, permanent magnets.



Índice general

Capítulo 1.....	25
Objetivos y contenidos del proyecto.....	25
1. Objetivos y contenido del proyecto	26
1.1. Objetivo.....	26
1.2. Etapas de desarrollo.....	27
1.3. Estructura de la memoria	28
Capítulo 2.....	31
Introducción a los sistemas de embrague.....	31
2. Introducción a los sistemas de embrague	32
2.1. Descripción general.....	32
2.2. Clasificación.....	33
2.2.1. Embragues de fricción	34
2.2.2. Embragues hidráulicos.....	37
2.2.3. Embragues magnetorreológicos.....	38
Capítulo 3.....	39
Clasificación de los fluidos según su comportamiento	39
3. Clasificación de los fluidos según su comportamiento	40
3.1. Introducción	40
3.2. Fluidos Newtonianos.....	41
3.3. Fluidos No-Newtonianos	43
3.3.1. Fluidos independientes del tiempo	43
3.3.2. Fluidos dependientes del tiempo.....	44
3.4. Fluidos Viscoelásticos.....	45
Capítulo 4.....	47
Fluidos magnetorreológicos. Propiedades y aplicaciones.....	47
4. Fluidos magnetorreológicos. Propiedades y aplicaciones.	48
4.1. Descripción general.....	48
4.2. Composición y propiedades	49
4.3. Modelado fluido magnetorreológico.	50
4.4. Ventajas e inconvenientes de los fluidos magnetorreológicos.....	52
4.5. Aplicaciones de los fluidos magnetorreológicos	53

Capítulo 5.....	55
Campo Magnético	55
5. Campo Magnético	56
5.1. Generación campo magnético. Ley de Lorentz.....	56
5.2. Comportamiento de los materiales bajo la acción de un campo magnético.....	57
5.3. Ley de Biot-Savart.....	63
5.3.1. Campo magnético generado por un solenoide.....	64
5.3.2. Campo magnético generado por un electroimán.	67
5.4. Intensidad de campo magnético H.	69
5.5. Comportamiento de los fluidos magnetorreológicos	70
Capítulo 6.....	73
Diseño original del embrague magnetorreológico.....	73
6. Diseño original del embrague magnetorreológico.....	74
6.1. Propósito de diseño	74
6.2. Descripción general del sistema original.....	75
6.3. Motores Ultrasónicos.....	77
6.4. Fluido magnetorreológico	78
6.5. Inconvenientes actuadores magnetorreológicos.....	79
6.6. Etapas de diseño del prototipo	79
6.6.1. Diseño original.....	79
6.6.2. Cálculo de par transmitido	80
6.6.3. Simulación del dispositivo original propuesto.....	81
Capítulo 7.....	83
Software empleado para diseño y simulación	83
7. Software empleado de diseño y simulación.	84
7.1. Descripción general.....	84
7.2. PTC Creo 2.0	85
7.2.1. PTC Creo Parametric 2.0	88
7.2.1.1. Descripción general	88
7.2.1.2. Entorno de trabajo Creo Parametric 2.0.....	90
7.3. ANSYS Maxwell.....	95
7.3.1. Elección de la herramienta de simulación.	96
7.3.2. Tutorial ANSYS Maxwell Versión 16.0.....	96
7.3.3. Configuración del Diseño.	97
7.3.3.1. Abrir Maxwell y guardar un Nuevo Proyecto.	97

7.3.3.2. Especificar el Tipo de Solución.	99
7.3.3.3. Configuración de unidades.	100
7.3.4. Modelado Geométrico.	100
7.3.5. Asignar materiales a los objetos.	101
7.3.6. Asignar Límites y Excitaciones.	102
7.3.7. Configuración y Ejecución de un Análisis.	104
7.3.8. Importación de archivos a ANSYS Maxwell.	106
7.4. Matlab.	108
7.5. SolidWorks.....	109
Capítulo 8.....	111
Desarrollo y ensamblaje en Creo Parametric 2.0	111
8. Desarrollo y ensamblaje en Creo Parametric 2.0	112
8.1. Desarrollo de piezas	112
8.2. Ensamblaje del conjunto	123
Capítulo 9.....	125
Problemas del modelo actual.....	125
9. Problemas del modelo actual.....	126
9.1. Problemas detectados.....	126
Capítulo 10.....	129
Modificaciones en la geometría del embrague	129
10. Introducción.....	130
10.1. Modificación del eje de entrada.	130
10.2. Modificación anillo de obturación en V.	131
10.2.1. Sellos HMS5 y HMSA10.....	133
10.2.2. Selección.	135
10.3. Modificación tapa eje de salida.....	137
10.4. Modificación rodamientos 61800,61802 y 61807.	139
10.4.1. Selección de nuevos modelos de rodamientos.	141
10.4.1.1. Rodamientos con placas de protección.	142
10.5. Modificación carcasa superior.	146
10.6. Modificaciones carcasa inferior.	147
10.7. Geometría final del modelo.	148

Capítulo 11.....	151
Estudio de generación de campo magnético	151
11. Estudio de generación de campo magnético.....	152
11.1. Requerimientos iniciales de diseño y limitaciones.	152
11.2. Análisis teórico del campo magnético generado por un solenoide.....	153
11.2.1. Tensión cortante transmitida por fluido magnetorreológico usando un solenoide.	153
11.2.2. Cálculo con Matlab del punto teórico de diseño.	158
11.2.3. Simulaciones con Maxwell utilizando un solenoide.	168
11.2.3.1. Simulación con eje de entrada de hierro.	168
11.2.3.2. Simulación con eje de entrada de aluminio.	175
11.2.4. Análisis teórico con 2 superficies de fricción.	178
11.2.5. Simulaciones con 2 superficies de fricción y eje de entrada de hierro.....	182
11.3. Análisis teórico utilizando electroimanes.	183
11.3.1. Tensión cortante transmitida por el embrague utilizando 2 electroimanes.	183
11.3.2. Simulaciones utilizando 2 electroimanes.	186
11.4. Uso de imanes permanente como fuente generadora de campo magnético.	188
11.4.1. Generalidades sobre imanes	188
11.4.2. Curva de histéresis	189
11.4.3. Métodos de desmagnetización.	191
11.4.4. Uso de imanes permanentes en embrague magnetorreológico	192
Capítulo 12.....	193
Conclusiones	193
12. Conclusiones.....	194
12.1. Mejoras geométricas del diseño:	194
12.2. Generación de campo magnético	196
Capítulo 13.....	199
Trabajos futuros	199
13. Trabajos futuros.....	200
Capítulo 14.....	201
Bibliografía	201
14. Bibliografía.....	202
14.1. Páginas o documentos electrónicos en la red.....	202
14.2. Libros	204
14.3. Congresos o reuniones	204

Anexos.....	205
--------------------	------------

Índice de figuras

Figura 2.1: Embragado y desembagado de dos ejes.....	32
Figura 2.2: Posición embragada.	34
Figura 2.3: Posición desembagada.....	34
Figura 2.4: Embrague de fricción de muelles helicoidales.	35
Figura 2.5: Embrague de fricción de diafragma.	36
Figura 2.6: Embrague de fricción automático.	36
Figura 2.7: Embrague de fricción de discos múltiples.	37
Figura 2.8: Embrague hidráulico.....	38
Figura 2.9: Embrague magnetorreológico.....	38
Figura 3.1: Tipos de Fluidos.	40
Figura 3.2: Curva de fluidez de un fluido newtoniano.	42
Figura 3.3: Curva de viscosidad de fluidos newtonianos.	42
Figura 3.4: Comportamiento fluidos No-Newtonianos.	44
Figura 3.5: Fluidos tixotrópicos y reopécticos.	44
Figura 4.1: Comportamiento de un fluido magnetorreológico ante un estímulo magnético.....	48
Figura 4.2: Estructura fibrilar generada en presencia del campo magnético.	49
Figura 4.3: Tensión cortante en un fluido magnetorreológico.	51
Figura 4.4: A la izquierda amortiguador normal y en la derecha amortiguador con respuesta magnética.	53
Figura 4.5: Esquema simple de freno rotatorio basado en fluidos magnetorreológicos.	54
Figura 4.6: Aplicación de fluidos magnetorreológicos en utillajes flexibles.	54
Figura 5.1: Ejemplos de fuentes de generación campo magnético.	56
Figura 5.2: Dirección de F según regla mano derecha.	57
Figura 5.3: Contribución orbital.....	57
Figura 5.4: Contribución del electrón.....	58
Figura 5.5: Campo magnético generado por un imán permanente.....	58
Figura 5.6: Distorsión movimiento electrónico.	59
Figura 5.7: Magnetización por alineación de dipolos.....	60
Figura 5.8: Materiales Diamagnéticos.....	60
Figura 5.9: Materiales Paramagnéticos.....	61
Figura 5.10: Materiales Ferromagnéticos.	62
Figura 5.11: Campo magnético generado por un cable recto.....	63
Figura 5.12: Campo magnético generado por un solenoide.	64

Figura 5.13: Campo magnético generado en un punto interior de una espira.....	65
Figura 5.14: Gráfica $B_z = B_z(r)$	67
Figura 5.15: Campo generado por un electroimán.	68
Figura 5.16: Relación B y H fluido magnetorreológico.	70
Figura 5.17: Relación limite de fluencia (τ) y campo H.	70
Figura 6.1: Proyecto HYPER.	74
Figura 6.2: Sección transversal del actuador.....	75
Figura 6.3: Alzado sección del actuador	76
Figura 6.4: Banco de prueba para la articulación del codo.	77
Figura 6.5: Diseño de embrague magnetorreológico propuesto.....	79
Figura 7.1: Software utilizado.....	84
Figura 7.2: PTC Creo Parametric 2.0.....	90
Figura 7.3: Interface principal Creo Parametric 2.0.	91
Figura 7.4: Ventana gráfica.....	91
Figura 7.5: Barra de gráficos.....	92
Figura 7.6: Barra de gráficos.....	92
Figura 7.7: Barra de herramientas.....	92
Figura 7.8: Tabla de instrumentos.....	93
Figura 7.9: Cuadro de dialogo.....	93
Figura 7.10: Árbol de modelo.	94
Figura 7.11: Barra de estado.	94
Figura 7.12: Imagen del simulador ANSYS Maxwell.	95
Figura 7.13: Imagen del escritorio de trabajo de ANSYS Maxwell.	96
Figura 7.14: Tipos de diseño.....	97
Figura 7.15: Creación de un nuevo proyecto.	98
Figura 7.16: Ventana de modelado.	98
Figura 7.17: Creación de un nuevo diseño.	99
Figura 7.18: Tipos de soluciones para los proyectos.....	99
Figura 7.19: Unidades disponibles.....	100
Figura 7.20: Tabla de atributos.....	100
Figura 7.21: Tabla de atributos. Modificación de materiales.....	101
Figura 7.22: Tabla de la base de datos de los materiales.....	102
Figura 7.23: Añadir excitaciones. Por ejemplo la corriente.	103
Figura 7.24: Asignación de excitaciones al proyecto.....	104
Figura 7.25: Ejecución de un análisis.....	105

Figura 7.26: Resultados de una simulación.	105
Figura 7.27: Formatos compatibles con ANSYS Maxwell.	106
Figura 7.28: Importar un archivo.	107
Figura 7.29: Modelo importado a ANSYS Maxwell.	107
Figura 7.30: Interface principal de Matlab.	108
Figura 7.31: Interface principal de SolidWorks.	109
Figura 8.1: Vista extendida piezas embrague magnetorreológico.	112
Figura 8.2: Carcasa inferior diseño original.	113
Figura 8.3: Carcasa superior diseño original.	113
Figura 8.4: Rodamiento 61800.	114
Figura 8.5: Características rodamiento de bolas SKF 61800.	115
Figura 8.6: Rodamiento eje de entrada SKF 61807.	115
Figura 8.7: Características rodamiento SKF 61807.	116
Figura 8.8: Rodamiento eje de entrada SKF 61802.	116
Figura 8.9: Características rodamiento SKF 61802.	117
Figura 8.10: Anillo de retención DIN 471-d9.	117
Figura 8.11: Características de retención DIN 471-d9.	118
Figura 8.12: Anillo de retención DIN 471-d14.	118
Figura 8.13: Características anillo de retención DIN 471-d14.	119
Figura 8.14: Eje de salida diseño original.	120
Figura 8.15: Eje de entrada diseño original.	120
Figura 8.16: Anillo de obturación en V VR1/VA 20 VA R.	121
Figura 8.17: Características anillo de obturación en VR1/VA 20 VA R.	121
Figura 8.18: Tapa eje de salida diseño original.	122
Figura 8.19: Ensamblaje original embrague magnetorreológico.	123
Figura 8.20: Restricciones entre piezas.	123
Figura 8.21: Movimientos relativos entre piezas.	124
Figura 10.1: Modificación eje de entrada.	131
Figura 10.2: Ubicación anillo obturador en V.	132
Figura 10.3: Sello radial HMS5.	133
Figura 10.4: Sello radial HMSA10.	133
Figura 10.5: Sello radial con resorte en el labio de SKF.	133
Figura 10.6: Características sello radial con resorte HMS5.	135
Figura 10.7: Croquis anillo de obturación en V.	136
Figura 10.8: Croquis sello radial con resorte.	136

Figura 10.9: Modificaciones tapa eje de salida.	137
Figura 10.10: Vista frontal ampliada tapa eje de salida.	138
Figura 10.11: Modificaciones para alojar rodamiento 61808.	139
Figura 10.12: Ubicación rodamientos 61802 y 61807 a sustituir.	140
Figura 10.13: Ubicación rodamiento 61800 a sustituir.	140
Figura 10.14: Rodamientos con placas de protección.	142
Figura 10.15: Placas de protección.	142
Figura 10.16: Características rodamiento SKF 61802-2Z.	143
Figura 10.17: Características rodamiento SKF 61808.	144
Figura 10.18: Croquis dimensiones rodamiento 61808.	144
Figura 10.19: Características rodamiento SKF 61800-2Z.	145
Figura 10.20: Carcasa superior original.	146
Figura 10.21: Carcasa superior modificada.	146
Figura 10.22: Carcasa inferior original.	147
Figura 10.23: Carcasa inferior modificada.	147
Figura 10.24: Vista eje de entrada embrague modificado.	148
Figura 10.25: Vista eje de salida embrague modificado.	148
Figura 10.26: Sección embrague modificado.	149
Figura 11.1: Sección de ejemplo con 2 superficies de contacto.	154
Figura 11.2: Variación tensión cortante en función del radio en un cilindro.	155
Figura 11.3: Esquema de trabajo para obtener la tensión cortante en función del radio.	157
Figura 11.4: Familia de gráficas tensión cortante frente al radio.	157
Figura 11.5: Recta de diseño.	158
Figura 11.6: Gráfica $B(r)$ para $60.000 \text{ N} \times V's$	159
Figura 11.7: Relación B y H fluido magnetorreológico.	160
Figura 11.8: Relación limite de fluencia (τ) y campo H	161
Figura 11.9: $\tau(r, I_{60.000})$ comparada con recta de diseño.	162
Figura 11.10: Gráfica $B(r)$ para $55.000 \text{ N} \times V's$	163
Figura 11.11: $\tau(r, I_{55.000})$ comparada con recta de diseño.	164
Figura 11.12: Gráfica $B(r)$ para $52.000 \text{ N} \times V's$	165
Figura 11.13: $\tau(r, I_{52.000})$ comparada con recta de diseño.	166
Figura 11.14: $\tau(r, I_i)$ comparadas con recta de diseño.	167
Figura 11.15: Vista 3D modelo propuesto de simulación.	168
Figura 11.16: Modelo propuesto de simulación.	169
Figura 11.17: Simulación con eje de entrada de hierro.	169

Figura 11.18: Vector B generado en el fluido con eje de entrada de hierro con 60.000 A x V's.	170
Figura 11.19: Variación de B según r en fluido magnetorreológico.....	170
Figura 11.20: Vector B generado en el fluido con eje de entrada de hierro con 53.000 A x V's.	172
Figura 11.21: Vista tridimensional vector B con eje de entrada de hierro con 53.000 A x V's.....	173
Figura 11.22: Variación de B según r en fluido magnetorreológico.....	173
Figura 11.23: Simulación con todas las piezas de aluminio con N x I de 60.000 A x V's	175
Figura 11.24: Vector B generado en el fluido con componentes de aluminio y 60.000 A x V's.	176
Figura 11.25: Vista tridimensional vector B generado con componentes de aluminio y 60.000 A x V's.	176
Figura 11.26: Variación de B según r en fluido magnetorreológico.....	177
Figura 11.27: Análisis utilizando dos superficies de fricción.	178
Figura 11.28: $\tau(r, I_i)$ comparadas con recta de diseño con 2 superficies de contacto.	180
Figura 11.29: Sección de ejemplo con 2 superficies de contacto.	181
Figura 11.30: Gráfica de simulación suponiendo 2 superficies de fricción.	182
Figura 11.31: Análisis propuesto utilizando 2 electroimanes.	183
Figura 11.32: Modelo 2D electroimán.....	183
Figura 11.33: Valor máximo de tensión tangencial del fluido magnetorreológico.....	185
Figura 11.34: Análisis propuesto utilizando 4 electroimanes.	186
Figura 11.35: Campo magnético generado por 2 electroimanes.....	187
Figura 11.36: Variación de campo magnético B según coordenada r utilizando electroimanes.	187
Figura 11.37: Curva de histéresis de un imán.	189
Figura 11.38: Curva de histéresis materiales blandos y duros.....	191
Figura 11.39: Imán de neodimio con forma de anillo	192
Figura 12.1: Sello radial con resorte en el labio HMS5 V 19x30x7.....	194
Figura 12.2: Nuevos rodamientos con tapas de protección.	195
Figura 12.3: Modificaciones en la geometría de las carcasas exteriores.....	195
Figura 12.4: Superficies de contacto fluido-embrague.	197
Figura 13.1: Propuestas de nuevo diseño de embrague.....	200

Índice de tablas

Tabla 6.1: Par de transmisión para diferentes configuraciones de embrague y pesos.	81
Tabla 10.1: Dimensiones obturador original.	136
Tabla 10.2: Dimensiones nuevo obturador.	136
Tabla 10.3: Comparativa de dimensiones rodamientos 61807 y 61808.	144
Tabla 11.1: Tabla valores de r , B y H para N_{xl} de 60000 Ax V's.	160
Tabla 11.2: Tabla valores de r , B , H y τ para N_{xl} de 60000 Ax V's.	161
Tabla 11.3: Tabla valores de r , B , H y τ para N_{xl} de 55000 Ax V's.	163
Tabla 11.4: Tabla valores de r , B , H y τ para N_{xl} de 52000 Ax V's.	165
Tabla 11.5: Tabla resumen punto óptimo de trabajo con 1 superficie de fricción.	167
Tabla 11.6: Tabla de salida Maxwell variación campo magnético B en función del radio r	171
Tabla 11.7: Tabla de salida Maxwell variación campo magnético B en función del radio r	174
Tabla 11.8: Tabla de salida Maxwell variación campo magnético B en función del radio r	177
Tabla 11.9: Tabla comparativa punto óptimo de trabajo con 1 superficie de fricción.	178
Tabla 11.10: Tabla valores de r , B , H y τ para N_{xl} de 40.000 Ax V's.	180
Tabla 11.11: Punto de diseño utilizando 2 superficies de contacto y eje de entrada de hierro.	182
Tabla 11.12: Temperaturas de Curie de distintos materiales.	191
Tabla 12.1: Punto de diseño utilizando 2 superficies de contacto y eje de entrada de hierro.	196

Capítulo 1

Objetivos y contenidos del proyecto

1. Objetivos y contenido del proyecto

1.1.Objetivo

El objetivo principal de este proyecto final de carrera consiste en la mejora y acondicionamiento de un embrague magnetorreológico llevado a cabo por el departamento de Ingeniería de Sistema y Automática. Este embrague pretende formar parte de una prótesis de brazo para ser utilizada en rehabilitación para personas que presenten problemas de movilidad.

El hecho que este dispositivo quiera ser integrado como parte de un sistema portátil para rehabilitación, hace que se tengan cinco requerimientos de diseño muy importantes: funcionalidad, bajo peso, tamaño compacto, consumo energético razonable y coste de fabricación lo más barato posible.

El mencionado dispositivo, del cual un prototipo se ha modelado y fabricado un prototipo, presenta una serie de problemas por los cuales su funcionamiento no es el deseado. De esta manera, a través de diversas aplicaciones software de diseño y simulación se va a proceder a rediseñar el embrague magnetorreológico para solventar los problemas que actualmente presenta.

El objetivo principal puede componerse de los siguientes objetivos secundarios:

- Descripción general de los sistemas de embrague
- Descripción general de los fluidos y ,en concreto, de los fluidos magnetorreológicos
- Descripción y análisis del diseño original del prototipo actual
- Aproximación a las aplicaciones informáticas a utilizar en el desarrollo del proyecto: PTC Creo Parametric 2.0, Ansys Maxwell, Matlab y SolidWorks
- Modelado de las piezas que componen el embrague original en Creo Parametric 2.0
- Análisis de los defectos geométricos del diseño actual y rediseño y modelado de componentes.
- Estudios de generación del campo magnético mediante diferentes dispositivos y cálculo de las condiciones funcionamiento.
- Conclusiones sobre análisis y estudios realizados.

1.2.Etapas de desarrollo

En un proyecto de ingeniería hay que definir unas etapas de desarrollo para la consecución del objetivo perseguido. En este caso, al tratarse de un proyecto de investigación, las etapas son relativas, ya que en pleno proceso de investigación pueden surgir problemas y ser necesaria la modificación de las mismas. Para la consecución de los objetivos se han abordado las siguientes etapas:

Etapas 1: Definición de objetivos

En esta primera etapa se plantea la motivación y los objetivos que se han de alcanzar. Es necesario entender el funcionamiento de los elementos a estudiar para plantear así objetivos realistas.

Etapas 2: Búsqueda y estudio de documentos

Los medios empleados para el desarrollo de este proyecto serán fundamentalmente recursos obtenidos en la red para aclarar conceptos generales que ayuden a entender los parámetros utilizados en este proyecto, como por ejemplo conceptos de embragues, tipos de fluidos, propiedades de los fluidos magnetorreológicos, ecuaciones de campos electromagnéticos, etc..

Por otra parte, también se utilizarán documentos previos proporcionados por los desarrolladores del prototipo del embrague y que servirán como punto inicial para plantear las soluciones que resuelvan los problemas que presenta el actual dispositivo.

Cabe resaltar también que gran parte de los conceptos que se desarrollarán en los diferentes capítulos, procederán de asignaturas cursadas durante la carrera y estudios realizados por el tutor de este proyecto

Por último, el uso de diferentes herramientas de software empleadas para el desarrollo del proyecto, requieren de un aprendizaje previo mediante manuales y tutoriales que conlleve un tiempo significativo.

Etapas 3: Modelado y simulación por ordenador

En esta fase se modela el embrague magnetorreológico para someterlo posteriormente a estudio. Una vez se tengan los datos necesarios, éstos serán analizados, pudiendo provocar modificaciones en el modelo primario si los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios.

Etapa 4: Obtención y análisis de los resultados

Se miden y analizan todos los parámetros de importancia obtenidos con los diferentes software de modelado y simulación empleados y se procesan los resultados.

Etapa 5: Conclusiones finales

Tras analizar los resultados obtenidos se establecen unas reflexiones sobre el desarrollo del proyecto y el resultado final del mismo. Es decir, se presentan las conclusiones y propuestas a tener en cuenta para trabajos futuros.

Etapa 6: Elaboración del documento

Por último, y una vez desarrollado el proyecto en sí, se redacta la memoria del mismo. Para ello se seguirá fielmente la metodología llevada a cabo durante la realización de los estudios. Se tratará de que el documento sea estructurado, bien documentado y claro, con figuras y tablas que ayuden a la comprensión del mismo.

Cabe destacar que la Etapa 2 ha estado presente durante toda la realización del proyecto, ya que incluso en estadios muy avanzados del mismo, se han encontrado documentos que han replanteado las bases del estudio.

1.3.Estructura de la memoria

La estructura de esta memoria se puede resumir en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Introducción. Objetivo, etapas y estructura del proyecto.

Capítulo 2: Conceptos generales sobre los sistemas de embrague y clasificación de estos en función del medio de transmisión del movimiento.

Capítulo 3: Clasificación de los fluidos según su comportamiento.

Capítulo 4: Fluidos magnetorreológicos. Este capítulo 4 se hablara acerca de las principales características, aplicaciones y ecuaciones que rigen el comportamiento de estos fluidos.

Capítulo 5: Campo magnético. En este capítulo se realizara un repaso a conceptos generales de magnetismo y se analizarán en profundidad el campo magnético generado por algunos sistemas que son de interés para este proyecto.

Capítulo 6: Diseño original del embrague. En este capítulo se explicará el diseño original del embrague llevado a cabo por el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Este capítulo sirve de punto de partida para realizar las mejoras.

Capítulo 7: Software empleado en el proyecto. Se realizará una breve descripción de los 4 software empleados en este proyecto y se procederá a explicar más en profundidad los dos programas más utilizados: PTC Creo 2.0 y ANSYS Maxwell.

Capítulo 8: Desarrollo de las piezas originales en PTC Creo 2.0. En este apartado se explicará de forma abreviada el modelado de las piezas originales en PTC Creo Parametric 2.0.

Capítulo 9: Problemas presentes en el diseño actual del embrague. Este capítulo describe los problemas que presenta el modelo actual y son objeto de estudio en este proyecto. Los problemas descritos se deben a problemas relacionados con la geometría del embrague y problemas con el sistema encargado de generar campo magnético.

Capítulo 10: Soluciones a problemas geométricos. Este capítulo se procederá a analizar los defectos geométricos del diseño actual y se rediseñarán y modelarán los componentes.

Capítulo 11: Soluciones a problemas de generación de campo magnético. En este capítulo se mostrarán estudios de generación de campo magnético con diferentes dispositivos y se calcularán las condiciones de funcionamiento de acuerdo al par a transmitir.

Capítulo 12: Conclusiones. Este capítulo recoge las principales conclusiones obtenidas en los estudios y análisis realizados en los capítulos 10 y 11.

Capítulo 13: Trabajos futuros. En este último capítulo se proponen diferentes futuras líneas de estudio relacionadas con el embrague magnetorreológico.

Anexos: Para completar el proyecto se incluyen diferentes documentos de interés mencionados a lo largo de la memoria. Incluye desarrollos matemáticos del campo magnético generado por una espira, código de programación en Matlab que resuelve dicho desarrollo, hoja de características del fluido magnetorreológico empleado y planos de las piezas modificadas.

Capítulo 2

Introducción a los sistemas de embrague

2. Introducción a los sistemas de embrague

2.1.Descripción general

El embrague es un acoplamiento temporal utilizado para solidarizar dos piezas que se encuentran en un mismo eje. Se utiliza para transmitir a una de ellas el movimiento de rotación de la otra (transmisión de par y potencia) y desacoplarlas a voluntad de un operador externo cuando se desea modificar el movimiento sin necesidad de parar la otra[1].

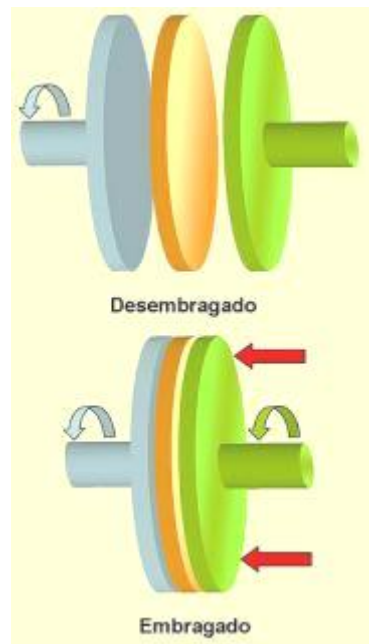


Figura 2.1: Embragado y desembragado de dos ejes.

Los embragues se hayan siempre intercalados entre un motor mecánico, eléctrico o térmico y el elemento de utilización para poder parar este último sin que deje de funcionar el motor.

La aplicación más común de los embragues es la automoción, aunque también están presentes en otros campos tales como maquinaria industrial, industria aeroespacial o cualquier aplicación que requiera transmisión de par y potencia entre distintos elementos.

2.2. Clasificación

Los distintos tipos de embragues existentes para la transmisión de par y potencia se clasifican en función del medio de transmisión por el cual se realiza el acople de los ejes de entrada y salida. De esta manera, distinguimos las siguientes soluciones constructivas:

- Embragues de fricción: La transmisión de par y potencia es realizada a través de superficies rugosas.
 - Tipos de embragues de fricción:
 - Embragues de muelles helicoidales
 - Embragues de diafragma
 - Embrague automático
 - Embrague de discos múltiples
- Embragues hidráulicos: En este tipo de embragues el medio de transmisión del movimiento es un fluido.
- Embrague magnetorreológico: Este tipo de embragues funcionan gracias a la aplicación de un campo electromagnético que produce el cambio de las propiedades del fluido encargado de la transmisión del movimiento.

En el siguiente apartado se va a proceder a hablar más en profundidad de los diferentes tipos de embrague mencionados.

2.2.1. Embragues de fricción

Son aquellos embragues en los que la transmisión del movimiento se logra mediante el contacto de superficies rugosas o de fricción, una de estas superficies se encontrará solidaria al eje conductor y la otra al eje conducido.

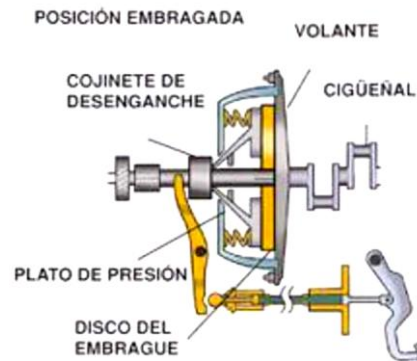


Figura 2.2: Posición embragada.

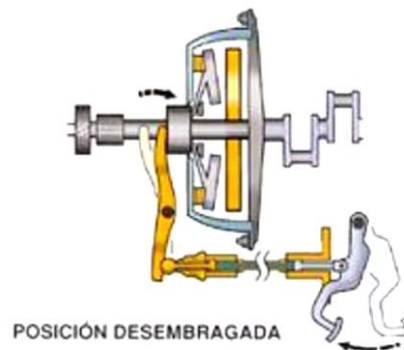


Figura 2.3: Posición desembragada.

La composición de los forros de los embragues de fricción normalmente no se encuentra limitada a un solo material, si no que se trata de una mezcla realizada con diferentes compuestos. Los principales materiales sinterizados utilizados para los embragues de fricción son los siguientes:

- Asbesto o amianto
- Partículas de fricción
- Agentes adhesivos (Resinas, caucho o combinación de ambas)
- Carbón negro
- Grafito

Recientemente se ha creado un nuevo tipo de forro llamado cerámico especialmente diseñado para vehículos pesados o aplicaciones en las cuales se necesite alta precisión. Tiene mayor efectividad aunque su coste es más elevado que el de los materiales convencionales.

Los diferentes tipos de embragues de fricción más utilizados a nivel industrial son los siguientes:

Embragues de muelles helicoidales:

La fuerza necesaria para ejercer la acción de embragado y desembragado se realiza por medio de uno o varios resortes. Estos resortes realizan el esfuerzo necesario para aprisionar al disco de embrague entre el volante motor y el plato de presión.

Normalmente se utilizan seis muelles helicoidales dispuestos de manera circular, consiguiendo así una presión uniforme sobre toda la superficie del plato de presión.

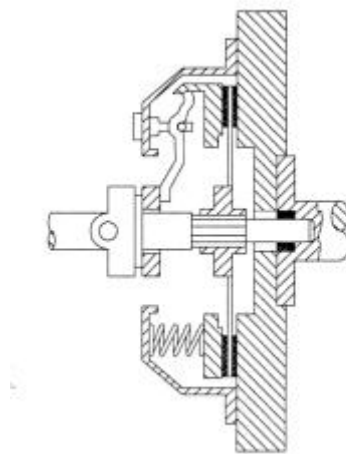


Figura 2.4: Embrague de fricción de muelles helicoidales.

Embragues de diafragma:

En este tipo de embragues, los muelles helicoidales mencionados en el modelo anterior son sustituidos por un diafragma elástico de acero que hace las funciones de resorte.

Con este sistema se consigue que el embrague no se vea influenciado por la fuerza centrífuga, la cual afecta a los muelles. Además de esto, se logra una presión uniforme sobre el plato de presión, el volante de inercia y el disco.

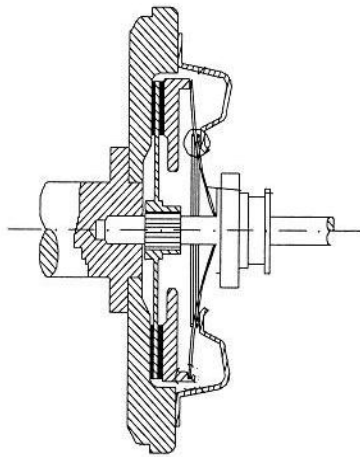


Figura 2.5: Embrague de fricción de diafragma.

Embrague automático:

La acción de embragar y desembragar esta confiada a un accionamiento mecánico por medio de contrapesos que funcionan por la acción de la fuerza centrífuga, de tal manera que cuando el motor gire al ralentí, los contrapesos están calculados para que no ejerzan presión sobre el plato, quedando por tanto en posición de desembragado. En el momento que el motor aumenta su régimen, la fuerza centrífuga hace desplazar los contrapesos hacia la periferia, empujando al plato de presión hacia su acoplamiento con el disco.

Solo se utilizan cuando no hay cambios de velocidades, como por ejemplo en los ciclomotores.

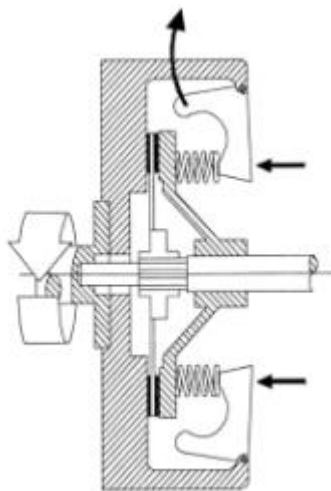


Figura 2.6: Embrague de fricción automático.

Embrague de discos múltiples:

Por regla general, este tipo de embragues se emplean únicamente en motocicletas o en turismo de gran potencia. Esta opción surge cuando por problemas de espacio en el motor, no se puede colocar el disco requerido para transmitir todo el par motor y es necesario acudir a embragues de discos múltiples, cuya superficie de adherencia es equivalente a la que se necesitaría con un solo disco.

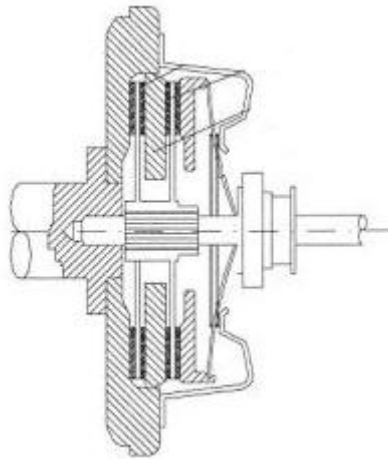


Figura 2.7: Embrague de fricción de discos múltiples.

2.2.2. Embragues hidráulicos

Los embragues hidráulicos son sistemas de acoplamiento que actúan como un embrague automático entre el motor y la caja de cambios (en la mayoría de los casos es automática o semiautomática), en los que la masa líquida (aceite mineral) es la encargada de transmitir el movimiento sin que exista la unión rígida entre los dos elementos. Este tipo de embragues hidráulicos son conocidos con el nombre de embragues hidrodinámicos o convertidores de par, según sea su construcción interna y el efecto que esto produce en la transmisión del par y la potencia.

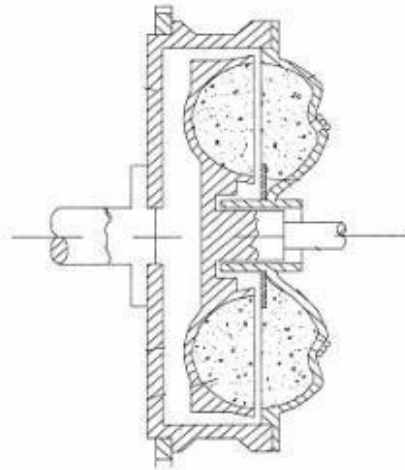


Figura 2.8: Embrague hidráulico.

2.2.3. Embragues magnetorreológicos

Este tipo de embragues, funcionan por la acción electromagnética de una masa polar alojada en el interior o exterior del embrague que provoca el cambio en las propiedades reológicas de un fluido transmisor. El accionamiento electromagnético está constituido por una bobina o por imanes permanentes, encargados de generar el campo electromagnético necesario para cambiar las propiedades del fluido.

La mejora de diseño de un prototipo de este tipo de embrague es el fundamento de este proyecto final de carrera. En la siguiente imagen, se ofrece un adelanto del embrague en cuestión:

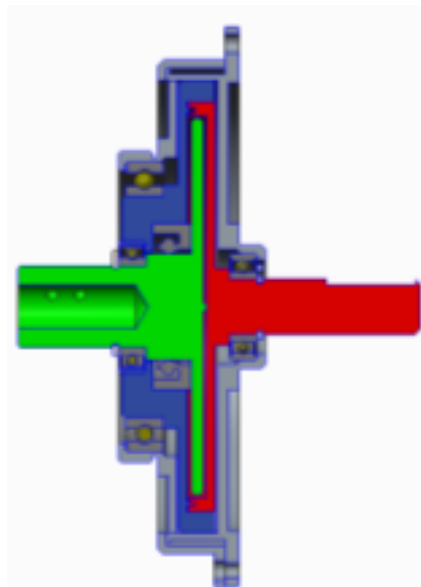


Figura 2.9: Embrague magnetorreológico.

Capítulo 3

Clasificación de los fluidos según su comportamiento

3. Clasificación de los fluidos según su comportamiento

3.1.Introducción

Antes de entrar en detalle en la descripción y características de los fluidos magnetorreológicos, lo primero de todo es conocer los tipos de fluidos [2] convencionales y el avance de la tecnología en el campo de los materiales para la construcción de dispositivos, y de este modo, tener una amplia visión de las aplicaciones en las diferentes áreas.

Los fluidos se clasifican de manera fundamental en los siguientes tipos:

- Fluidos Newtonianos
- Fluidos No-Newtonianos
- Fluidos Viscoelásticos

El siguiente esquema muestra los diferentes tipos de fluidos englobados dentro de la clasificación general:



Figura 3.1: Tipos de Fluidos.

3.2.Fluidos Newtonianos

Un fluido newtoniano se caracteriza por cumplir la Ley de Newton que describe el movimiento de los fluidos, es decir, fluido en los cuales existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante τ y la velocidad de deformación $\partial v/\partial n$ [2]. Por ejemplo, si se duplica el esfuerzo cortante, la velocidad de deformación también se duplicará. Esto se debe a que la viscosidad η se mantiene constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo cortante aplicado.

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.1)$$

- τ es la tensión tangencial ejercida sobre un punto del fluido o sobre una superficie sólida que contacto con el mismo, tiene unidades de presión o tensión [Pa].
- η es la viscosidad dinámica del fluido, para el caso de un fluido Newtoniano no depende de la temperatura ni del tiempo de aplicación del esfuerzo tangencial. Puede medirse en [Pa·s] o [Kg·s/cm²].
- $\frac{\partial v}{\partial y}$ es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección al plano en el que se calcula la tensión tangencial, medido en [s⁻¹].

Estos tipos de fluidos se representan con dos tipos de gráficas [3], la “*curva de fluidez*” y la “*curva de viscosidad*”.

En la curva de fluidez se estudia la velocidad de deformación en función del esfuerzo cortante, mientras que en la curva de viscosidad se representa la velocidad de deformación en función de la viscosidad.



Figura 3.2: Curva de fluidez de un fluido newtoniano.

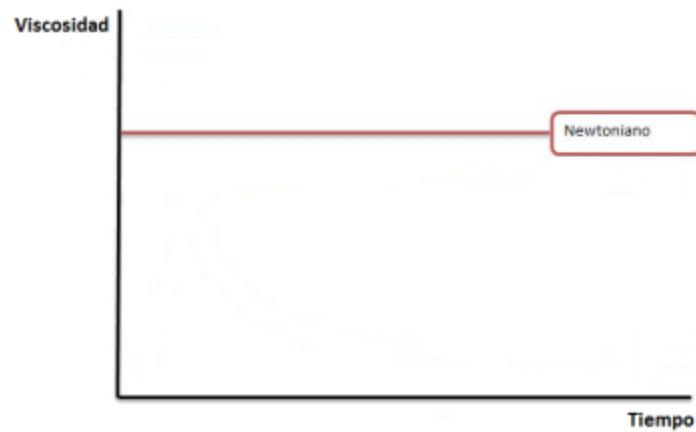


Figura 3.3: Curva de viscosidad de fluidos newtonianos.

Como se puede observar en la curva de fluidez, el valor de la viscosidad η es la tangente del ángulo que forman el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación, la cual es constante para cualquier valor aplicado. Además, se observa en la curva de viscosidad frente al gradiente de velocidad que la viscosidad es constante para cualquier velocidad de deformación aplicada.

3.3.Fluidos No-Newtonianos

Los fluidos No-Newtonianos son aquellos que no presentan una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. La viscosidad depende del esfuerzo cortante ejercido al fluido, además de depender fuertemente de la temperatura y de la presión. Estos fluidos a su vez se diferencian en dependientes e independientes del tiempo.

3.3.1. Fluidos independientes del tiempo

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo umbral, es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

Entre los fluidos sin esfuerzo umbral podemos encontrar los fluidos pseudoplásticos y los fluidos dilatantes:

- Los pseudoplásticos presentan una disminución de la viscosidad aparente a medida que aumenta el esfuerzo del corte. Este comportamiento es característico de materiales que presentan elevada viscosidad, la cual disminuye rápidamente cuando aumenta el esfuerzo cortante aplicado.
- Los fluidos dilatantes presentan un aumento de la viscosidad aparente al incrementar el esfuerzo de cortante. El aumento proporcional de la viscosidad con esfuerzo cortante eleva el valor de esta casi al infinito. Esta es la característica de comportamiento más relevante de una sustancia dilatante.

Entre los fluidos con umbral encontramos los fluidos plásticos de Bingham. Se denominan así a los fluidos que para tensiones tangenciales inferiores a un valor característico de esfuerzo cortante inicial se comportan elásticamente, y superado ese valor, muestran un comportamiento similar al de un fluido Newtoniano.

En esta grafica observamos la variación del esfuerzo tangencial frente a la velocidad de deformación para fluidos No-Newtonianos, comparados con el comportamiento que realiza un fluido Newtoniano.

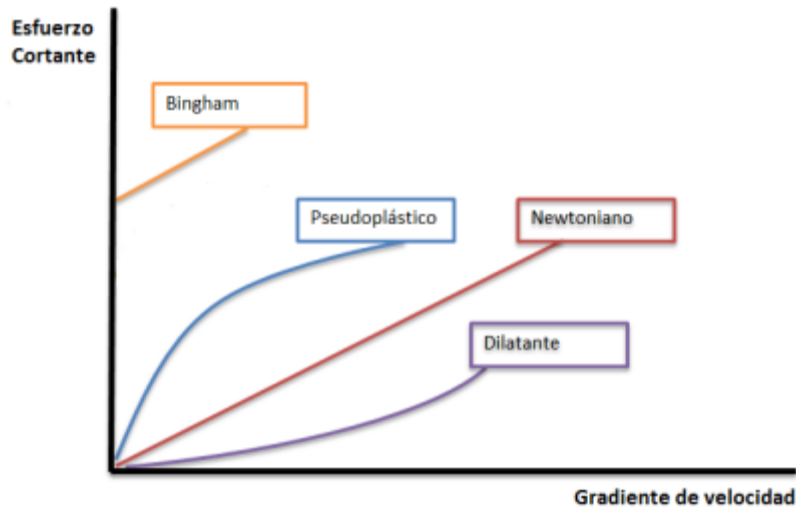


Figura 3.4: Comportamiento fluidos No-Newtonianos.

3.3.2. Fluidos dependientes del tiempo

Este tipo de fluidos se clasifican en dos tipos:

- Fluidos tixotrópicos, en los que su viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado.
- Fluidos reopécticos, en los cuales su viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación de la fuerza y vuelven a su estado anterior tras un tiempo de reposo.

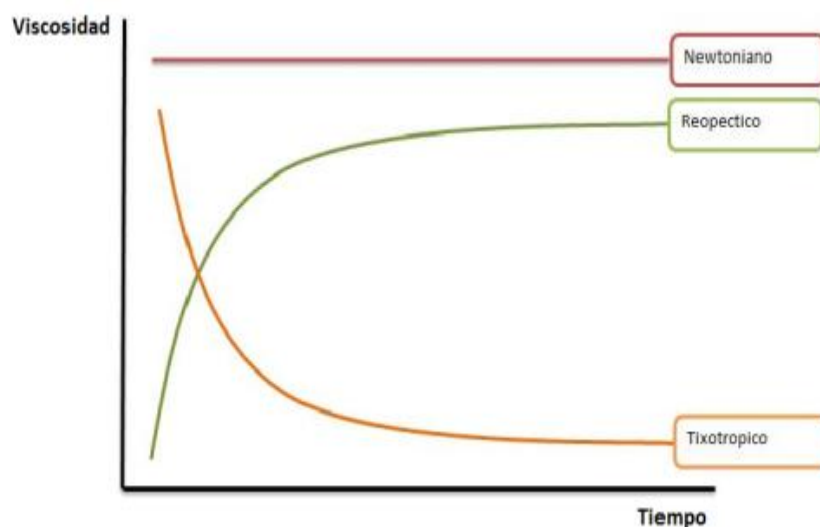


Figura 3.5: Fluidos tixotrópicos y reopécticos.

3.4.Fluidos Viscoelásticos

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar, a la vez, tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades es debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

Capítulo 4

Fluidos magnetorreológicos. Propiedades y aplicaciones.

4. Fluidos magnetorreológicos. Propiedades y aplicaciones.

4.1. Descripción general

Los fluidos magnetorreológicos [4] son fluidos cuyas propiedades reológicas se ven alteradas por la presencia de un campo magnético. Su viscosidad al aplicar un campo magnético se puede regular desde un fluido poco viscoso hasta un estado similar a una masilla o lodo muy espeso, sin modificar ni su forma ni su volumen. Estos fluidos son útiles en dispositivos donde se requiera una disipación de energía controlada (como frenos, embragues o amortiguadores), así como elementos de fijación en base a su variación de viscosidad. Debido a su aplicabilidad y su capacidad para conseguir rápidas y simples respuesta entre sistemas electrónicos y mecánicos, se están comenzando a utilizar de forma muy activa en la industria y en el desarrollo de nuevos productos.

Visualmente, los fluidos magnetorreológico son de color muy oscuro, prácticamente opacos. Si el fluido se encuentra en un recipiente abierto caerá, pero si se aplica suficiente campo no caerá y su aspecto y superficie se mantendrá invariable en el interior del envase.

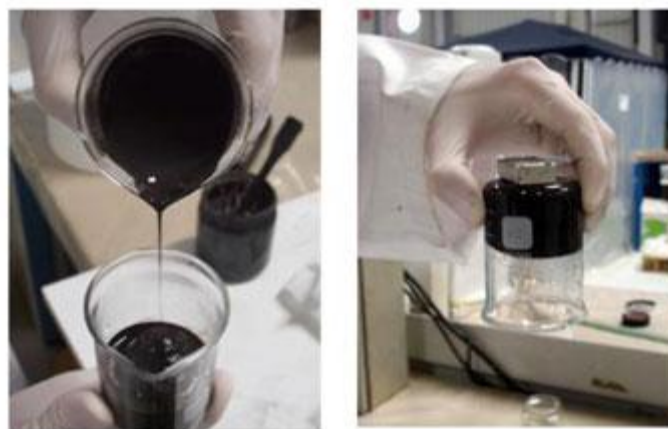


Figura 4.1: Comportamiento de un fluido magnetorreológico ante un estímulo magnético.

Su comportamiento activo ante un campo magnético se debe a que estos fluidos son suspensiones de partículas magnéticas en un fluido portador, estabilizado por un surfactante y otros aditivos. Al aplicar un campo magnético, las partículas tienden a polarizarse y alinearse con el campo, formando una estructura fibrilar encadenada en unos pocos milisegundos. Así, la viscosidad de estos fluidos aumenta en función de la intensidad del campo aplicado. Este aumento no es ilimitado sino que se termina por exhibir una saturación magnética gradual. Esta saturación del fluido se produce a un valor igual al producto de la polarización de saturación del material magnético.

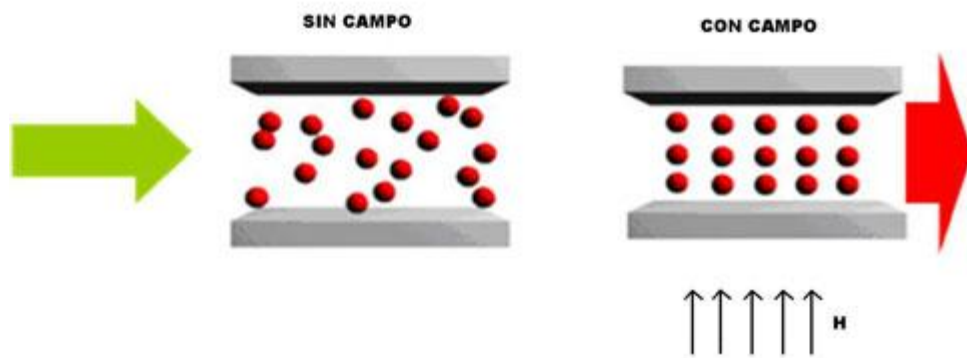


Figura 4.2: Estructura fibrilar generada en presencia del campo magnético.

Es importante distinguir los fluidos magnetorreológicos de los ferrofluidos. Los fluidos magnetorreológicos presentan en su composición partículas de tamaño micro y nano, sin embargo, en los ferrofluidos todas las partículas son entorno a los 10 nm con lo que el fluido es prácticamente una suspensión coloidal, no sedimenta y ante el campo magnético las partículas tienden a seguir las líneas de fuerza y forman agujas que sobresalen de su superficie, siendo sus propiedades y precio muy diferentes.

4.2. Composición y propiedades

Las variables responsables de las características de los fluidos magnetorreológicos son varias y muy diferentes debido a los siguientes factores:

- Tipo de partícula magnética, así como el tamaño, geometría, distribución de tamaños y la cantidad utilizada.
- Fluido portador, que tiene una influencia importante en la viscosidad del fluido, comportamiento térmico, químico y en la sedimentación de las partículas.
- Aditivos añadidos para el control de variables tales como sedimentación, viscosidad, tixotropía y estabilización del fluido.

El estudio de estas variables y su influencia sobre la resistencia al flujo de los fluidos magnetorreológicos permiten predecir de una manera más o menos aproximada el comportamiento de los fluidos en base a su composición y ajustarlos a la medida de las aplicaciones.

Se han estudiado las diferentes variables que pueden afectar el comportamiento de estos materiales como los aditivos o la viscosidad del fluido portador, que tiene un efecto muy elevado en la sedimentación de manera que cuanto menor sea ésta mayor es la sedimentación, independientemente de que ésta sea aditivada, para aumentar la viscosidad. También se han estudiado diferentes combinaciones de tamaño, forma y naturaleza de las partículas para alcanzar una óptima distribución.

El punto de fluencia o 'Yield Point' es el momento en que el fluido comienza a fluir. El esfuerzo necesario para llegar a este punto se llama 'esfuerzo de fluencia' o esfuerzo umbral, más conocido como 'Yield Stress'. Los fluidos magnetorreológicos muestran habitualmente Yield Stress de **50-100 kPa** para campos magnéticos aplicados de 150-250 kA/m y una viscosidad sin campo magnético de **200-300 mPa·s** a 25°C.

El esfuerzo umbral estático se considera el esfuerzo mínimo para que el fluido sufra una deformación que se pueda considerar como flujo.

Otra propiedad a controlar es la inevitable sedimentación. Cuando el fluido queda en reposo, las partículas tienden a decantar, siendo necesario considerar para las aplicaciones las siguientes premisas:

- Minimizar lo más posible la sedimentación desde la formulación.
- Ante periodos largos de reposo del dispositivo que contiene los fluidos magnetorreológicos, considerar sistemas de reflujo para mantener dispersas las partículas.
- Caracterizar adecuadamente el fluido para asegurar su rápida y óptima dispersión una vez se redispersa el fluido. Es conveniente evitar que tras la sedimentación se generen aglomeraciones que modifiquen su dispersión y modifiquen las condiciones iniciales del fluido.

4.3. Modelado fluido magnetorreológico.

Los fluidos magnetorreológicos son suspensiones de micropartículas magnetizables disueltas en un fluido portador. Normalmente, los fluidos magnetorreológicos fluyen libremente, teniendo una consistencia muy similar a la que tienen los aceites lubricantes. Sin la aplicación de un campo magnético, su comportamiento se aproxima al comportamiento de un fluido Newtoniano.

Con la aplicación de un campo magnético, las partículas de hierro se polarizan y forman cadenas en la dirección de las líneas del flujo magnético. La aplicación de este campo magnético, origina un cambio en la viscosidad del fluido magnetorreológico, aproximándose el comportamiento del fluido magnetorreológico al que tendría un sólido.

Este estado es apropiado para unir dos platos de un embrague como un único cuerpo.

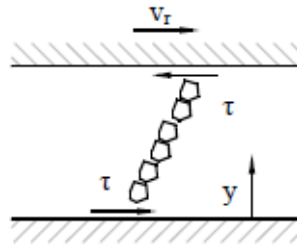


Figura 4.3: Tensión cortante en un fluido magnetorreológico.

Para representar matemáticamente el comportamiento del fluido magnetorreológico a menudo se suele utilizar el modelado de un plástico de Bingham como se mostro en la figura 3.4 del capítulo anterior. La tensión cortante producida en un fluido magnetorreológico bajo la acción de un campo magnético puede ser calculada según la siguiente fórmula:

$$\tau = \tau(B) + \eta \frac{\partial V}{\partial y} \quad (4.1)$$

Donde:

τ : Tensión cortante total producida en el fluido magnetorreológico

$\tau(B)$: Tensión cortante dependiente del campo magnético aplicado

η : Viscosidad del fluido magnetorreológico sin magnetizar

$\frac{\partial V}{\partial y}$: Gradiente de velocidad en dirección transversal (velocidad de deformación)

La formula anterior está compuesta por dos términos, de los cuales se pueden obtener las siguiente conclusiones.

En ausencia de un campo magnético, el primer termino desaparece de la ecuación y únicamente contribuye al total de la tensión cortante los efectos producidos por el fluido en estado liquido con un comportamiento de plástico de Bingham.

Sin embargo, bajo la aplicación de un campo magnético, comienza a tener aportación la tensión cortante dependiente de la intensidad del campo magnético aplicado $\tau(B)$ que junto a tensión cortante producida por un comportamiento como plástico de Bingham, componen la tensión cortante total transmitida por el fluido magnetorreológico.

4.4. Ventajas e inconvenientes de los fluidos magnetorreológicos

Las ventajas de los fluidos magnetorreológicos son varias. Muestran, bajo la acción de un campo magnético, una rápida variación en sus propiedades reológicas (**15–25 ms**). Se rigen por la intensidad de corriente que genera el campo magnético. Sus rangos de voltaje son inferiores a **10 V** e intensidad inferiores a **2 A** pueden ser suficientes, lo cual permite contar, para el diseño de un dispositivo, con fuentes normales de energía. Los fluidos magnetorreológicos son capaces de alcanzar valores altos de esfuerzos de cizalla (**sobre 50-100 kPa**) lo cual implica que solo es necesario activar una pequeña cantidad de fluido para llegar a las prestaciones requeridas. Esto afecta positivamente al tamaño y peso del diseño.

Por otro lado, no son muy sensibles a los contaminantes e impurezas que pueden aparecer durante su fabricación y posterior uso. Esta misma insensibilidad del principio de funcionamiento hacia los contaminantes permite estabilizar los fluidos magnetorreológicos frente a la sedimentación sin afectar por ello a sus propiedades magnetorreológicas. Se puede lograr un modo ‘a prueba de fallos’ en los dispositivos introduciendo imanes permanentes de manera que se active el fluido magnetorreológico sin necesidad de otra fuente de energía. Son capaces de operar en un amplio rango de temperaturas, en base al fluido portador y se adaptan fácilmente a diferentes geometrías. Son apropiados para ser empleados en utillajes de piezas de geometría compleja, de piezas muy flexibles y de piezas que se van debilitando a medida que se van mecanizando.

En cuanto a los inconvenientes, los campos magnéticos no son fáciles de aplicar ni de usar. La intensidad de campo se ve afectada por la presencia de materiales férricos, son pesados y requiere de espacio para albergar los electroimanes. La discordancia entre las densidades de la partícula metálica y el fluido portador es muy grande con lo que la tendencia a la sedimentación es alta. La alta densidad de la partícula también deriva en una alta densidad del fluidos magnetorreológicos en conjunto (**3-4 g/cm³**). La viscosidad típica inicial (en ausencia de campo magnético) ya es relativamente alta, lo que conlleva una alta fricción o pérdidas de carga en dispositivos como en los frenos rotatorios cuando no se requiere su activación. Su tiempo de respuesta, aun siendo muy rápido, es más lento que el de los fluidos electrorreológicos.

4.5. Aplicaciones de los fluidos magnetorreológicos

Los fluidos magnetorreológicos son útiles en dispositivos donde se requiera una disipación de energía controlada (amortiguadores, frenos, embragues, etc.) así como elementos de fijación en base a su variación de viscosidad. El interés en estos materiales viene de su capacidad para conseguir rápidas y simples interfaces de respuesta entre sistemas electrónicos y mecánicos, por lo que es aplicable en los siguientes sectores:

Amortiguación de automóviles. Pruebas realizadas por Monroe, uno de los principales fabricantes de amortiguadores del mundo, determinó que la distancia de frenado con amortiguadores en mal estado, aumentaba la distancia de frenado a **70 km/h** de **23,2 metros** hasta los **34,5 metros**. Empresas fabricantes de automóviles como **Cadillac** y **Audi** (en los modelos TT y R8), ya han empezado a incluir en algunos modelos amortiguadores basados en esta tecnología.

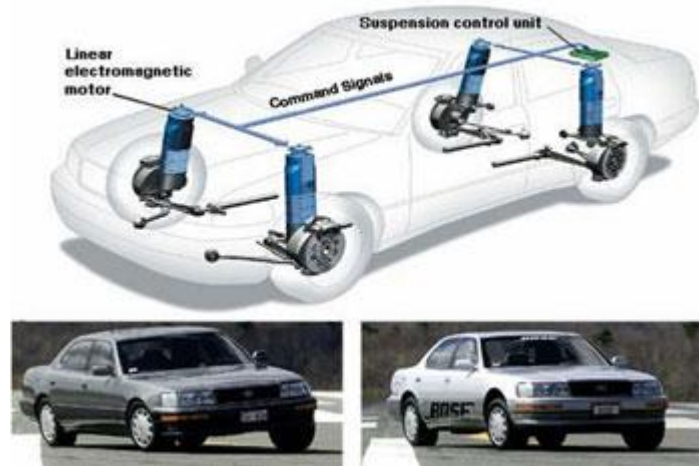


Figura 4.4: A la izquierda amortiguador normal y en la derecha amortiguador con respuesta magnética.

Amortiguación en electrodomésticos, adaptando la rigidez del amortiguador a las distintas fases del ciclo de lavado y carga de ropa en la lavadora.

Amortiguadores en construcción civil, como pueden ser en puentes o edificios con dispositivos anti-seísmos, entre otros. Permiten contrarrestar el movimiento que se produce en un puente debido al viento.

Medicina, como sistema de control en las prótesis de rodillas o de codos.

Sistema de freno, donde destaca la aplicación de frenos de bicicletas estáticas con sistema de freno de disco basado en presencia de fluidos magnetorreológicos.

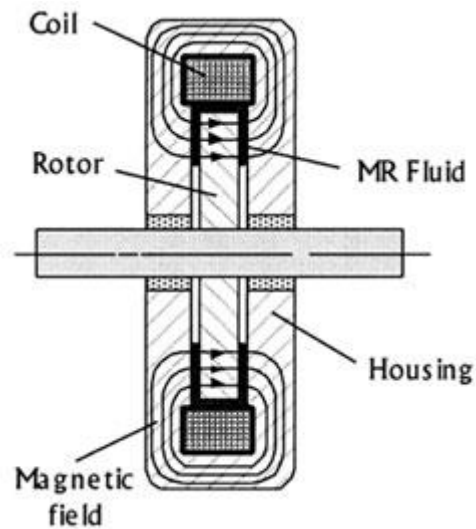


Figura 4.5: Esquema simple de freno rotatorio basado en fluidos magnetorreológicos.

Máquina-herramienta, se trabaja en dispositivos de amortiguación de vibraciones y en posibles dispositivos de fijación para la realización de utillajes flexibles.



Figura 4.6: Aplicación de fluidos magnetorreológicos en utillajes flexibles.

Capítulo 5

Campo Magnético

5. Campo Magnético

5.1. Generación campo magnético. Ley de Lorentz.

Los campos magnéticos [6] son producidos por corrientes eléctricas, las cuales pueden ser corrientes macroscópicas en cables o corrientes microscópicas asociadas con los electrones en órbitas atómicas. El campo magnético **B** se define en función de la fuerza ejercida sobre las cargas móviles en la Ley de la fuerza de Lorentz. La interacción del campo magnético con las cargas, nos conduce a numerosas aplicaciones prácticas. Las fuentes de campos magnéticos son esencialmente de naturaleza dipolar, teniendo un polo norte y un polo sur magnéticos.

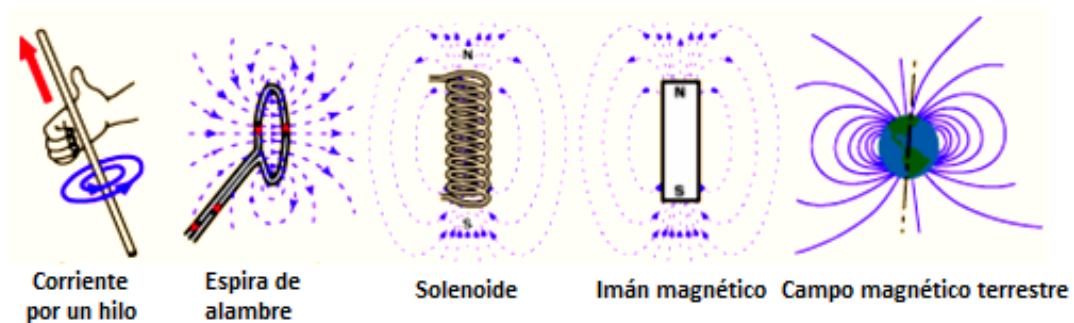


Figura 5.1: Ejemplos de fuentes de generación campo magnético.

La unidad en el sistema internacional para medir el campo magnético es el Tesla [**T**]. La cantidad magnética **B** que en este proyecto se llama "campo magnético", en otras ocasiones recibe el nombre de "densidad de flujo magnético". El Weber por metro cuadrado [**W/m²**] es el nombre antiguo de Tesla, siendo el Weber la unidad de flujo magnético.

El campo magnético **B** se define de la ley de la Fuerza de Lorentz, y específicamente de la fuerza magnética sobre una carga en movimiento:

$$\mathbf{F}_{\text{magnética}} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (5.1)$$

La ecuación anterior indica que cuando una carga **q** posee una velocidad **v** en el seno de un campo magnético, aparece una fuerza magnética **F** que es proporcional a **q** y a **v**, y al seno del ángulo que forman **v** y **B**. La dirección de la fuerza está dada por la regla de la mano derecha, como muestra la figura siguiente:

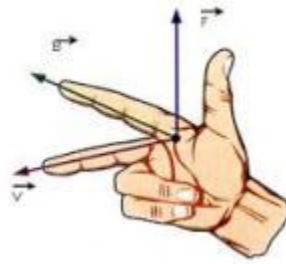


Figura 5.2: Dirección de F según regla mano derecha.

5.2.Comportamiento de los materiales bajo la acción de un campo magnético.

[5] Desde el principio, la imposibilidad de separar el polo norte y el polo sur de un imán indujo a considerar que la base del magnetismo natural estaba en los constituyentes elementales de la materia: los átomos. Los conocimientos actuales sobre estructura atómica no sólo han confirmado plenamente esta hipótesis de partida, sino que la han extendido a las propias partículas constituyentes de los átomos.

Hoy en día es sabido que el magnetismo es una propiedad intrínseca de la materia debida básicamente a dos contribuciones:

- La orbital, asociada a cómo se encuentra girando el electrón en torno al núcleo atómico:

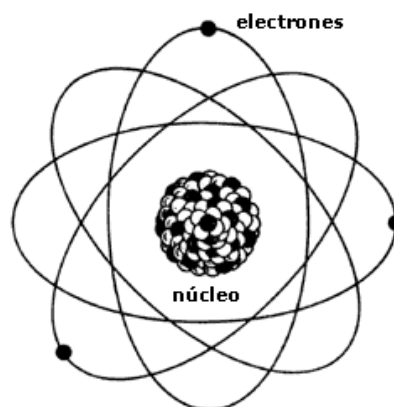


Figura 5.3: Contribución orbital.

- La del propio electrón, asociada a su espín, es decir, a su capacidad de generar campo magnético por sí mismo.

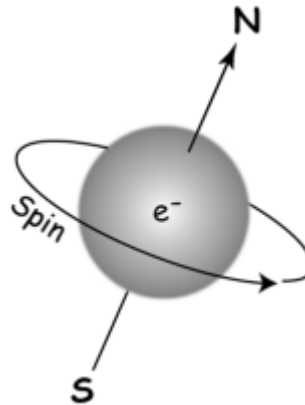


Figura 5.4: Contribución del electrón.

En general el campo magnético creado por los electrones predomina sobre el asociado a sus orbitales.

El movimiento orbital y de espín de los electrones les hace actuar como pequeñas corrientes circulares que generan campos magnéticos elementales, al modo de imanes o dipolos magnéticos. La suma vectorial de todos los dipolos magnéticos correspondientes a los electrones de una partícula (átomo, molécula o ión) constituye el dipolo magnético resultante para dicha partícula. Las partículas con electrones apareados (la inmensa mayoría) anulan sus dipolos magnéticos dando un dipolo magnético resultante nulo; las que presentan electrones desapareados (como sucede con los átomos de hierro, níquel o cobalto) manifiestan su carácter de imán elemental.

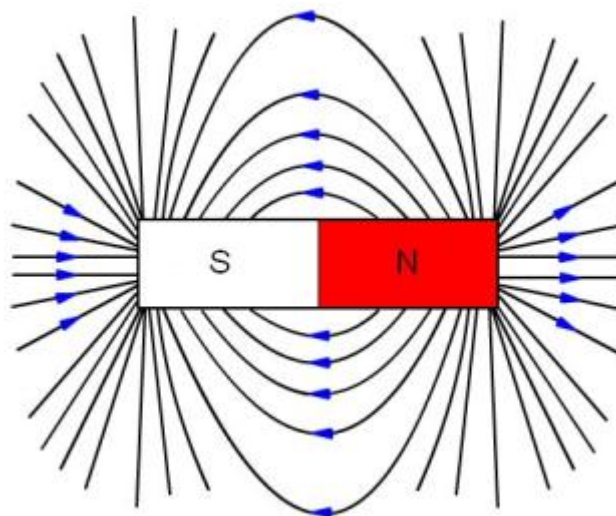


Figura 5.5: Campo magnético generado por un imán permanente.

A pesar de esto, en ausencia de campo magnético exterior, la inmensa mayoría de los materiales no presentan propiedades magnéticas. Incluso aquellos materiales constituidos por partículas con dipolo magnético resultante no nulo, no manifiestan magnetismo al compensarse estos dipolos elementales por su orientación aleatoria, al azar.

Ahora bien, en presencia de campo magnético externo todo material experimenta el fenómeno de distorsión del movimiento electrónico el cual consiste en la aparición de un débil dipolo magnético opuesto al campo exterior en cada una de sus partículas, el cual se representa en la figura siguiente:

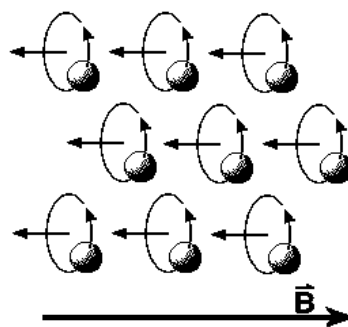


Figura 5.6: Distorsión movimiento electrónico.

Se explica en base a la Ley de Lenz, la cual relaciona cambios producidos en el campo eléctrico en un conductor con la variación de flujo magnético en dicho conductor, y afirma que las tensiones o voltajes inducidos sobre un conductor y los campos eléctricos asociados son de un sentido tal que se oponen a la variación del flujo magnético que las induce.

El flujo de un campo magnético uniforme a través de un circuito plano viene dado por:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = B \cdot S \cdot \cos(\alpha) \quad (5.2)$$

Donde:

Φ : Flujo magnético. La unidad en el SI es el weber [**Wb**].

\mathbf{B} : Inducción magnética. La unidad en el SI es el tesla [**T**].

\mathbf{S} : Superficie definida por el conductor.

α : Ángulo que forman el vector **\mathbf{S}** perpendicular a la superficie definida por el conductor y la dirección del campo.

Todos los materiales terrestres se hallan sometidos al campo magnético de la Tierra, luego experimentan este fenómeno.

Los materiales constituidos por partículas con dipolo magnético neto experimentan en presencia de campo externo, además del efecto anterior, la magnetización por alineación de sus dipolos con el campo exterior. Este efecto es reducido por el efecto de distorsión anterior, pero en general es más intenso que este.

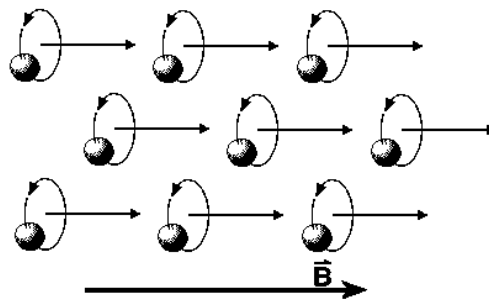


Figura 5.7: Magnetización por alineación de dipolos.

La existencia de estos dos efectos permite clasificar a los materiales por su comportamiento frente a campos magnéticos externos en tres tipos diferentes, que se caracterizan por su valor de permeabilidad magnética:

Materiales Diamagnéticos.

Presentan magnetización sólo por efecto de distorsión del movimiento electrónico de sus partículas:

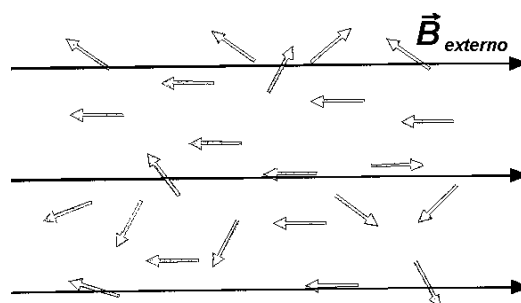


Figura 5.8: Materiales Diamagnéticos.

En ausencia de campo externo no manifiestan propiedad magnética alguna; en la cercanía de un campo externo intenso tienden a desplazarse hacia las zonas de menor intensidad.

Poseen una permeabilidad magnética ligeramente inferior a la del vacío.
Constituyen la mayor parte de los compuestos químicos (H_2O , SiO_2 , NaCl , sustancias orgánicas,...) y sustancias elementales (H_2 , N_2 , S_8 , C , Bi , Cu , Pb , Hg , Au , Ag ,...).

Materiales Paramagnéticos.

Presentan magnetización por alineación, efecto que supera ligeramente a la distorsión del movimiento electrónico:

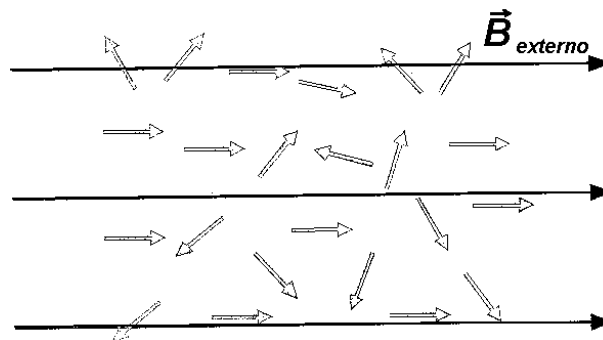


Figura 5.9: Materiales Paramagnéticos.

En ausencia de campo externo no manifiestan propiedad magnética alguna; en la cercanía de un campo externo intenso tienden a desplazarse hacia las zonas de mayor intensidad.

Poseen una permeabilidad magnética ligeramente superior a la del vacío.
Pertenecen a este tipo O_2 , Sn , Al , Na , Pt , Ca , U , Cr , Mg ,...

El paramagnetismo aumenta al descender la temperatura, pues disminuye la agitación térmica y la alineación de los dipolos se realiza más fácilmente.

Materiales Ferromagnéticos.

La magnetización por alineación es muy superior al efecto de distorsión electrónica en estos materiales:

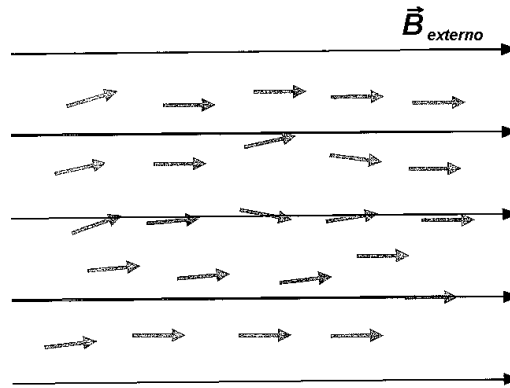


Figura 5.10: Materiales Ferromagnéticos.

Pueden presentar magnetización incluso en ausencia de campo magnético externo.

Poseen una permeabilidad magnética excepcionalmente alta.

A temperatura ambiente, son paramagnéticos Fe, Co, Ni, Gd, Dy, aleaciones de estos elementos, CrO_2 ,...

Las partículas de los materiales ferromagnéticos interactúan alineándose unas con otras, y dan lugar a agrupaciones cuyos campos magnéticos se potencian entre sí; estos cúmulos de partículas alineadas se llaman dominios magnéticos.

5.3. Ley de Biot-Savart.

La ley de Biot-Savart [6] indica el campo magnético creado por las corrientes eléctricas estacionarias. Se trata de una de las leyes fundamentales de la electroestática.

En el caso de las corrientes que circulan por circuitos filiformes (o cerrados), la contribución de un elemento infinitesimal de longitud $d\vec{L}$ del circuito recorrido por una corriente I crea una contribución elemental de campo magnético $d\vec{B}$ en el punto situado en la posición que apunta el vector \vec{r} a una distancia r respecto de $d\vec{L}$, quien apunta en la dirección de la corriente I :

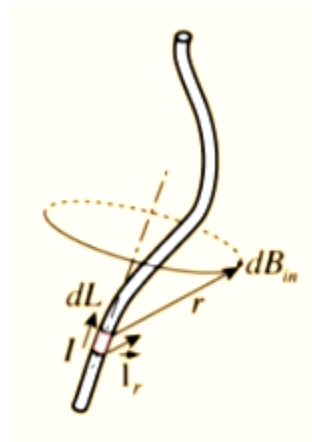


Figura 5.11: Campo magnético generado por un cable recto.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{L} \times \vec{I}_r}{4\pi r^2} \quad (5.3)$$

Donde:

$d\vec{B}$: Diferencial campo magnético \mathbf{B} .

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío, $4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

I : Valor de la corriente que circular por el cable.

r : Distancia desde el cable al punto de generación del campo.

$d\vec{L}$: Longitud infinitesimal de conductor con corriente I .

\vec{I}_r : Vector unitario para especificar la dirección de la distancia r desde el vector actual hasta el punto de campo.

Esta Ley de Biot-Savart, se puede utilizar para distintas geometrías en las cuales aparezca un cable conductor por el que circule una intensidad de corriente de valor I . Para el caso en cuestión del embrague magnetorreológico, se va a proceder al estudio del campo magnético generado dos sistemas diferentes.

Por un lado, se realizarán estudios utilizando como fuente de campo magnético un solenoide y por otro, realizaremos diversas simulaciones y comprobaciones para la generación del campo magnético utilizando electroimanes.

Debido a la utilización de estos sistemas en punto posteriores de este proyecto fin de carrera, en los dos siguientes apartados se extiende la aplicación de la Ley de Biot-Savart para cada uno de estas dos fuentes de generación de campo magnético en cuestión.

5.3.1. Campo magnético generado por un solenoide.

Para el estudio del campo magnético generado por un solenoide en cualquier punto de su interior, se comenzará analizando el campo magnético generado por una única espira.

Posteriormente, una vez conocidas las expresiones que permiten conocer el campo magnético generado por una espira en cualquier punto del espacio, se podrá extender al caso de un solenoide intercambiando el valor de la intensidad total I que recorre el hilo por el equivalente número de vueltas de cable conductor que conforman dicho solenoide, multiplicado por la intensidad que circular por el dicho cable conductor ($N \times I$).

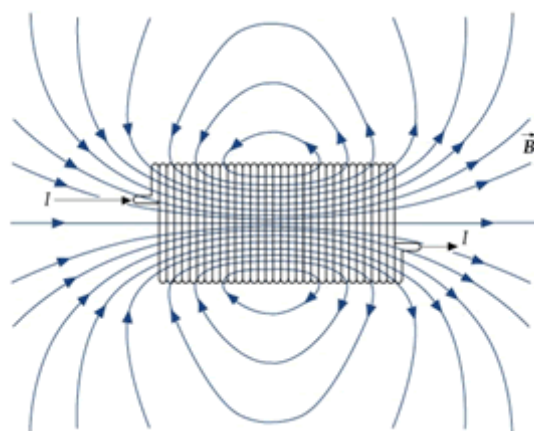


Figura 5.12: Campo magnético generado por un solenoide.

Con estas expresiones, posteriormente se podrá calcular el campo magnético transmitido a cualquier punto del fluido magnetorreológico y de esta manera podrá ser posible saber si el fluido alcanza un valor de fluencia o 'Yield Stress' suficiente para poder transmitir el par requerido en el embrague magnetorreológico para la aplicación en cuestión.

Para ello, se parte de la base que establece la Ley de Biot-Savart, la cual afirma que el campo \mathbf{B} producido por una corriente i se obtiene con la siguiente expresión [16]:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi} \oint \frac{\vec{u}_t \times \vec{u}_r}{r^2} d\mathbf{l} \quad (5.4)$$

Donde:

$d\mathbf{l}$: Elemento diferencial de corriente.

\vec{u}_t : Vector unitario que señala la dirección y el sentido de la corriente.

\vec{u}_r : Vector unitario que señala el punto \mathbf{P} donde se calcula el campo magnético.

Como aplicación de la Ley de Biot-Savart, se va a realizar el cálculo del campo magnético creado por una espira.

El campo producido por una espira de radio a tiene simetría axial, por lo tanto, bastaría con calcular las componentes \mathbf{B}_y y \mathbf{B}_z del campo magnético en un punto \mathbf{P} (0, y, z) del plano YZ.

En la figura 5.13 se realiza un croquis para aclarar dicha situación:

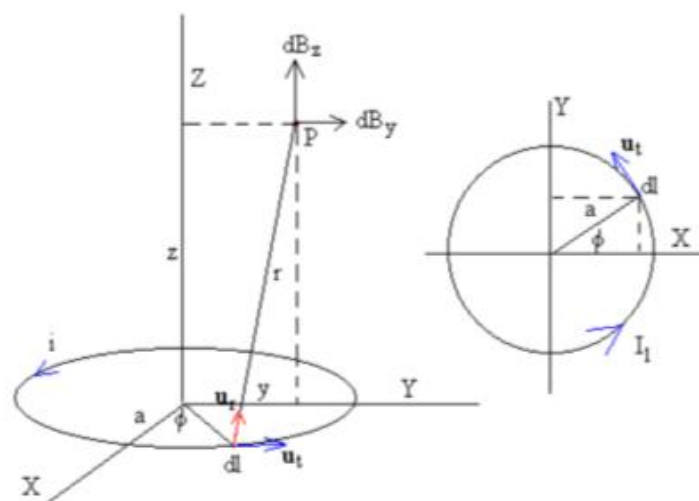


Figura 5.13: Campo magnético generado en un punto interior de una espira.

Como se puede observar en la figura anterior, la distancia r entre el elemento de corriente $d\mathbf{l} = \mathbf{a} \cdot d\Phi$ que está situado en el punto $(\mathbf{a} \cdot \cos(\Phi), \mathbf{a} \cdot \text{sen}(\Phi), 0)$ y el punto $P(0, y, z)$ considerado es:

$$r = \sqrt{a^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot a \cdot y \cdot \text{sen}(\Phi)} \quad (5.5)$$

$$\vec{u}_r = \frac{-\mathbf{a} \cdot \cos(\Phi) \cdot \vec{i} + (y - \mathbf{a} \cdot \text{sen}(\Phi)) \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}}{r} \quad (5.6)$$

$$\vec{u}_t = -\text{sen}(\Phi) \vec{i} + \cos(\Phi) \vec{j} \quad (5.7)$$

Efectuando el producto vectorial $\vec{u}_t \times \vec{u}_r$, quedan las siguientes componentes del campo magnético:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot a \cdot z \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\Phi)}{r^3} d\Phi \quad (5.8)$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot a \cdot z \int_0^{2\pi} \frac{\text{sen}(\Phi)}{r^3} d\Phi \quad (5.9)$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot a \int_0^{2\pi} \frac{a - y \cdot \text{sen}(\Phi)}{r^3} d\Phi \quad (5.10)$$

Realizando una serie de cambios de variable, los cuales se encuentran esbozados de manera detallada en **Anexo I**, se llegan a las siguientes expresiones del campo magnético de las componentes B_y y B_z , las cuales expresan en términos de las integrales elípticas completas de primera $K(m)$ y segunda especie $E(m)$ de la siguiente forma:

$$B_y = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{3/2}} \cdot z \left(-\sqrt{2 \cdot m} \cdot K(m) + \frac{2 - m}{2 - 2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) \right) \quad (5.11)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{3/2}} \left(a \frac{m}{2 - 2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) + y \sqrt{2 \cdot m} \cdot K(m) - \frac{2 - m}{2 - 2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) \right) \quad (5.12)$$

Resolviendo estas ecuaciones expresadas en términos de las integrales elípticas mediante métodos numéricos, se podrá conocer el campo magnético generado en cualquier punto del espacio, en concreto en el plano de la elíptica.

Para ello, ha sido elaborado en Matlab un programa que permite resolver dichas ecuaciones y obtener una representación de la función según la coordenada radial. El código de programación que resuelve estas integrales se encuentra desarrollado en el **Anexo 2**. En la imagen 5.14 se muestra la grafica $B_z = B_z(r)$ para una cierta corriente $N \times I$ proporcionada por dicho programa:

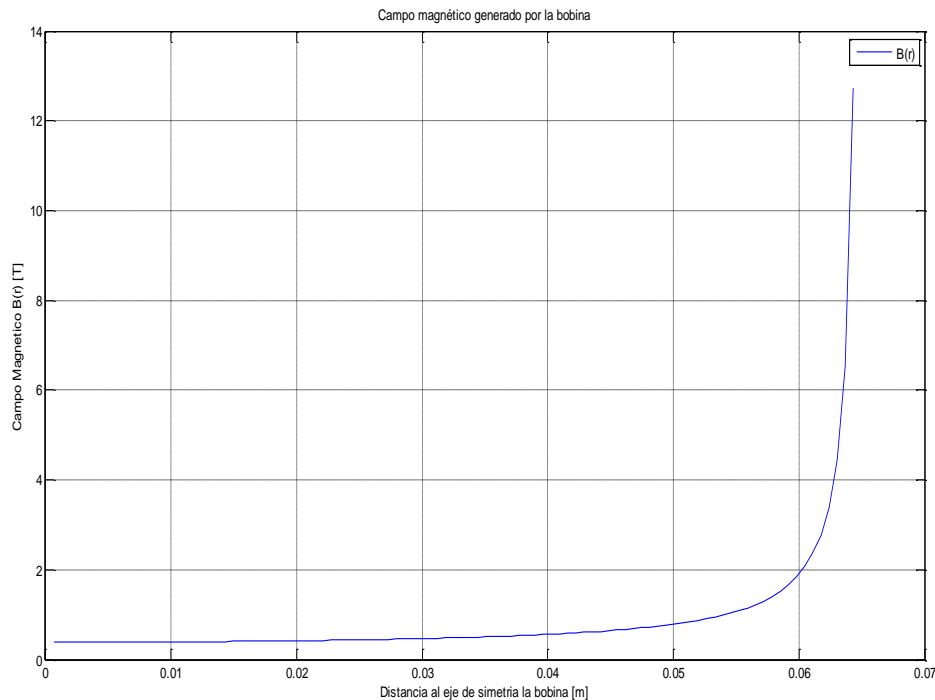


Figura 5.14: Gráfica $B_z = B_z(r)$

La mayor utilidad que nos proporcionan estas ecuaciones es la posibilidad de conocer la variación del campo magnético de forma radial, es decir, podremos obtener una relación entre la intensidad necesaria que tiene que pasar por el hilo para generar un determinado campo magnético y el par que es capaz de transmitir el fluido magnetorreológico el cual varía de forma lineal en la coordenada radial. Se estudiará en profundidad en el **Capítulo 11** de esta memoria.

5.3.2. Campo magnético generado por un electroimán.

Un electroimán es un tipo particular de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa dicha corriente. Tal efecto se consigue mediante dos metales; uno en estado neutro y otro formado por un cable enrollado sobre el primero y atravesado por dicha corriente.

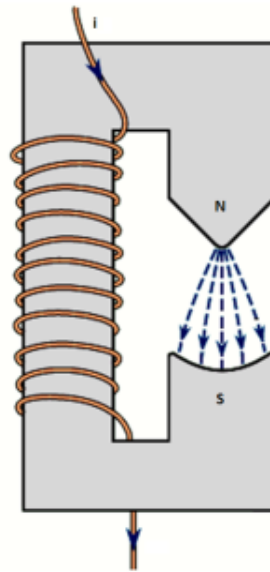


Figura 5.15: Campo generado por un electroimán.

El tipo de electroimán más simple está constituido por un cable conductor enrollado formando una bobina. Pueden producirse campos magnéticos mucho más fuertes si se sitúa un núcleo de material paramagnético o ferromagnético (normalmente hierro dulce) dentro de la bobina.

Posteriormente, al someter un material ferromagnético a un campo magnético intenso, los dominios tienden a alinearse con éste, de forma que aquellos dominios en los que los dipolos están orientados con el mismo sentido y dirección que el campo magnético inductor aumentan su tamaño. Este aumento de tamaño se explica por las características de las paredes de Bloch, que avanzan en dirección a los dominios cuya dirección de los dipolos no coincide; dando lugar a un monodominio. Al eliminar el campo, el dominio permanece durante cierto tiempo. El núcleo concentra el campo magnético, que puede entonces ser mucho más fuerte que el de la propia bobina y dependiendo de la histéresis del material, el campo permanecerá más o menos tiempo después de cesar la corriente del electroimán.

La principal ventaja de un electroimán sobre un imán permanente es que el campo magnético puede ser rápidamente manipulado en un amplio rango controlando la cantidad de corriente eléctrica. Sin embargo, se necesitan unas fuentes continuas de energías eléctricas para mantener el campo.

En aplicaciones donde no se necesita un campo magnético variable, los imanes permanentes suelen ser superiores. Adicionalmente, éstos pueden ser fabricados para producir campos magnéticos más fuertes que los electroimanes de tamaños similares.

5.4. Intensidad de campo magnético H .

Los campos magnéticos generados por las corrientes y que se calculan por la ley de Ampere o la Ley de Biot-Savart, se caracterizan por el campo magnético B medido en Teslas. Pero cuando los campos generados pasan a través de materiales magnéticos que por sí mismo contribuyen con sus campos magnéticos internos, surgen ambigüedades sobre que parte del campo proviene de las corrientes externas, y que parte la proporciona el material en sí. Como práctica común se ha definido otra cantidad de campo magnético, llamada usualmente "intensidad de campo magnético", designada por la letra H . Se define por la siguiente relación:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (5.13)$$

Tiene un valor que designa de forma inequívoca, la influencia que ejerce la corriente externa en la creación del campo magnético del material, independientemente de la respuesta magnética del material. La relación de B se puede escribir de forma equivalente:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (5.14)$$

H y M tendrán las mismas unidades, A/m . Para distinguir aún más B de H , a veces se le llama a B densidad de flujo magnético o inducción magnética. A la cantidad M en estas fórmulas, se le llama magnetización del material.

Otro uso común para la relación entre B y H es:

$$B = \mu \cdot H \quad (5.15)$$

Donde:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (5.16)$$

Siendo μ_0 la permeabilidad magnética del vacío y μ_r la permeabilidad relativa del material. Si el material no responde al campo magnético externo, no produciendo ninguna magnetización, entonces $\mu_r = 1$.

5.5. Comportamiento de los fluidos magnetorreológicos

El comportamiento de los fluidos magnetorreológicos [7] por la presencia de los campos magnéticos queda descrito acorde a las siguientes curvas de histéresis que relacionan **B** y **H**:

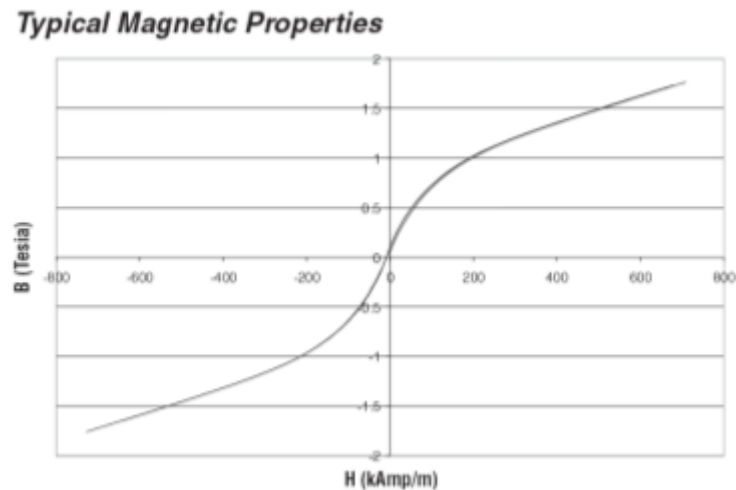


Figura 5.16: Relación B y H fluido magnetorreológico.

Una vez que el material se encuentra magnetizado por la presencia del campo **B**, se produce un cambio en las propiedades reológicas del material, en concreto, de la viscosidad. El cambio de esta propiedad, lleva inherente una diferencia del punto de fluencia o 'Yield Stress' del fluido, la cual es la variable de interés para transmitir el par necesario en el embrague magnetorreológico. La relación entre el campo **H** y el límite de fluencia en el fluido magnetorreológico queda relacionada por la siguiente gráfica:

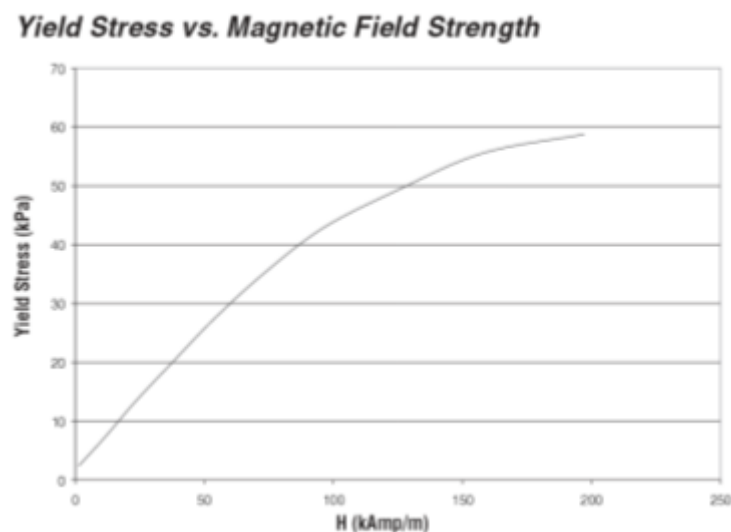


Figura 5.17: Relación límite de fluencia (τ) y campo H.

Estas gráficas que describen el comportamiento del fluido magnetorreológico, son obtenidas del fabricante estadounidense LORD. El fluido magnetorreológico escogido es el modelo **MRF-132DG** cuya hoja de características completa puede consultarse en **Anexo 3**.

En capítulos posteriores, se trabajará con estas gráficas para obtener el punto de trabajo necesario del fluido para el campo magnético generado y viceversa, es decir, para transmitir el par necesario de diseño cual es el valor de campo magnético **B** que es necesario generar.



Capítulo 6

Diseño original del embrague magnetorreológico

6. Diseño original del embrague magnetorreológico

6.1. Propósito de diseño

En este capítulo se va a describir el embrague diseñado originalmente previo a este proyecto y que ha servido de punto de partida para realizar las mejoras. Todos los datos y características que aparecen descritos en este capítulo han sido proporcionados por los diseñadores del embrague [21]

En los últimos años, el uso de la robótica para rehabilitación de pacientes con trastornos de movilidad funcional se ha vuelto cada vez más popular, permitiendo a dichos pacientes recuperar o mejorar sus capacidades funcionales de una manera adaptable. La definición de diferentes ejercicios de entrenamiento y la mejora de las terapias de rehabilitación física con las avances de sistemas robóticos, permiten a los terapeutas asistir mejor a sus pacientes, aunque todavía se enfrenta a varios problemas cuando se trata de cuestiones de actuación del sistema. Algunas de las características de los actuadores clásicos como por ejemplo el ruido, el peso, autonomía y el tamaño en relación con la fuerza del actuador y su eficiencia, los hacen poco adecuados para tales aplicaciones a día de hoy.

El objetivo principal de este apartado es presentar el diseño original de un actuador basado en motor ultrasónico y un embrague magnetorreológico, que serán integrados en un dispositivo que se utiliza en la rehabilitación robótica para la articulación del codo. A pesar de que estar destinado a trabajar en la extremidad superior humana, otros diseños futuros también serán estudiados para otras articulaciones humanas.

Este diseño ha realizado en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid, que abarca el proyecto HYPER español CONSOLIDER-INGENIO 2010, como parte relacionada de control del actuador y la integración de ellos en sistemas más grandes.



Figura 6.1: Proyecto HYPER.

6.2.Descripción general del sistema original

Los embragues han jugado un papel importante en la medicina, ya que su tamaño ha sido posible reducirlo suficientemente como para ser utilizados en aplicaciones portátiles. Por otro lado, se desea un tiempo de respuesta rápido y un comportamiento suave en la mayoría de los casos, y es por eso que el dispositivo se basa en fluidos magnetorreológicos como medio de transmisión de las fuerzas de torsión.

Los embragues estándar utilizan la fricción entre superficies diferentes para la transmisión de movimiento de un eje al otro. Los embragues basados en fluidos magnetorreológicos añaden la posibilidad de "desbloquear" o liberar el par de salida al instante. Además, la inercia de rotación se reduce y se disipa en un medio líquido cuando no hay ningún campo magnético aplicado al fluido, por lo que este medio viscoso permite una respuesta dinámica suave.

El accionador original se compone de motor ultrasónico, un engranaje planetario (con una proporción de **4,3:1**) y un embrague magnetorreológico. El motor ultrasónico ofrece un par de **1 N·m** a una velocidad de **150 rpm** y su uso junto con un engranaje planetario permite formar un actuador con un par máximo **4 N·m** con una velocidad del **37,5 rpm**. Una sección transversal del accionador y el embrague magnetorreológico se puede ver en la siguiente figura:

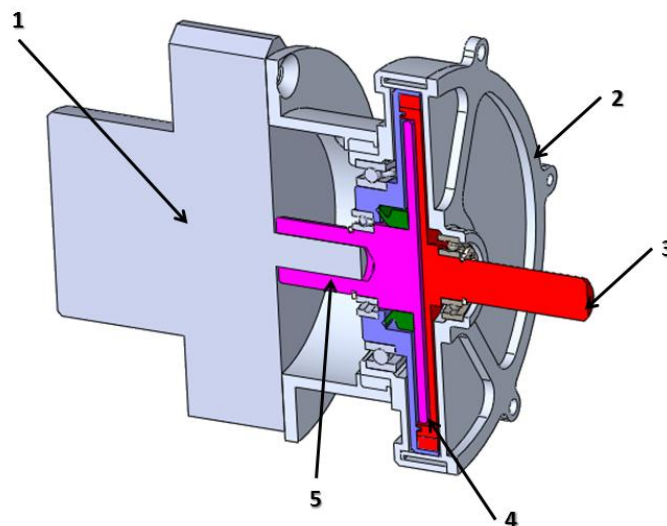


Figura 6.2: Sección transversal del actuador.

1. Motor y engranajes planetarios

2. Embrague carcasa

3. Eje de salida

4. Espacio libre para el fluido magnetorreológico

5. Eje de entrada

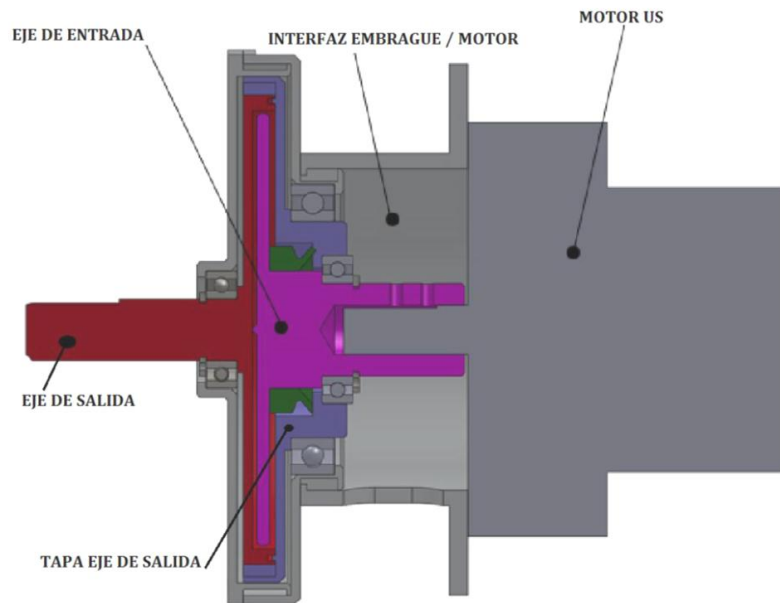


Figura 6.3: Alzado sección del actuador

El peso total del actuador está representado por la suma de los tres dispositivos: el peso del motor ultrasónico (**250 g**), el peso del engranaje planetario (**200 g**) y el peso de embrague electromagnético (**500 g**). Las dimensiones máximas del actuador están dadas por el diámetro del embrague (**89 mm**) con una longitud total (motor, engranaje planetario y embrague) de **132,2 mm**. Para poner a prueba la viabilidad del sistema se desarrolló un banco de pruebas que estimula el miembro superior, la simulación de software y su arquitectura de control también se presentan en este diseño.

Sin embargo, no es posible tener una simulación precisa, debido a las diferencias de los ángulos de cada persona individual, correlacionados con la estructura del brazo de diferentes peso y musculatura. Los estudios que se realizaron pusieron de manifiesto que, en la vida cotidiana, la articulación del codo muestra un arco funcional de **100 grados** de flexión y **50 grados** de supinación, aunque los ángulos de los dos grados de libertad, pueden llegar a **150 a 85 grados**, respectivamente.

El diseño que se propuso para el banco de pruebas permitió la simulación sólo para el ángulo flexor, ya que se considera el principal movimiento del codo. El peso del brazo y el antebrazo se calcularon de acuerdo con el peso de una persona de **70 Kg** y **1,80 m** de altura, sabiendo que el segmento de brazo es de 2,6%, el antebrazo es 1,6% y la mano es 0,7% de la masa total. Bajo estas condiciones se determinó que el brazo del banco de pruebas tiene un peso de **1,82 Kg** y el antebrazo con la mano, tiene un peso de **1,61 Kg**. Los tamaños se calcularon de acuerdo a la altura individual, que representa 14,6% para el antebrazo, 18,6% para el brazo y el 10,8% para la mano.

Con estos parámetros el banco de pruebas fue capaz de simular la inercia de los segmentos. De acuerdo con las características del banco de pruebas, el momento que transmite la fuerza de la articulación del codo de acuerdo con el centro de gravedad del segmento del antebrazo se pudo calcular de acuerdo a la siguiente expresión:

$$M = w \cdot g \cdot r = 1,6 \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 3,2 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.1)$$

Donde **M** es el momento en vigor para la articulación del codo, **w** el peso, **g** la aceleración de la gravedad y **r** el radio (de la articulación para el centro de gravedad del segmento antebrazo).

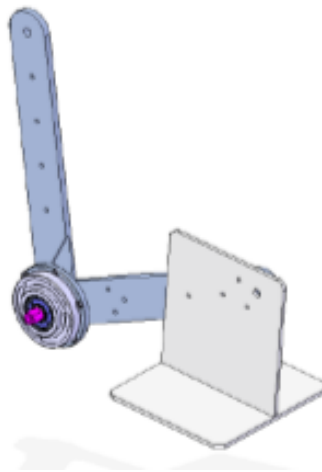


Figura 6.4: Banco de prueba para la articulación del codo.

6.3. Motores Ultrasónicos

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la generación del par para la transmisión del movimiento del brazo se va a realizar a través de un motor ultrasónico y un reductor.

Los motores ultrasónicos son un tipo de actuadores que utiliza la vibración mecánica de nivel ultrasónico como fuente de accionamiento. Las características de estos tipos de actuadores permiten utilizarlos para aplicaciones relacionadas con la robótica, automoción, aplicaciones aeroespaciales, prótesis o en aplicaciones donde es necesario un buen posicionamiento y baja velocidad. Algunos ejemplos de estas aplicaciones robóticas donde se utilizaron motores ultrasónicos son una mano robótica, una prótesis de mano y el dispositivo de reducción de temblor.

En comparación con los motores electromagnéticos convencionales, estos últimos tienen varias ventajas importantes tales como alto par de retención, respuesta de alta precisión, alta densidad de par a baja velocidad, funcionamiento silencioso sin ruido electromagnético y tamaño compacto, peso reducido, etc. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes que limitan su uso hoy en día en materia de rehabilitación. Las principales desventajas de este tipo de motor son su reducida vida útil y ligera oscilación de su velocidad.

En la rehabilitación robótica, una cuestión importante es la interacción entre el cuerpo humano con el dispositivo de rehabilitación, su portabilidad y el tiempo de respuesta del actuador. Otros criterios que deben tenerse en cuenta son la estética y la comodidad del dispositivo. Estos requisitos dependerán en gran medida del dispositivo accionado, que debe ser ligero en peso, tener un tamaño pequeño y no producir excesivo ruido. Los dispositivos basados en los motores convencionales el ruido es muy frecuente, en cambio los motores ultrasónicos tienen operación silenciosa que los hace más apropiados para aplicaciones portátiles en las que el dispositivo interactúa directamente y por períodos prolongados con los usuarios en su vida diaria.

Por otro lado, en los sistemas de rehabilitación, es muy importante el tiempo de respuesta rápida del dispositivo, cuando se detiene el accionamiento y deja el cuerpo libre para relajar los músculos o para continuar con el ejercicio de rehabilitación con un movimiento más lento.

Estas situaciones pueden ocurrir en caso de músculos involuntarios contracciones.

6.4. Fluido magnetorreológico

Las características que presentan estos fluidos explicadas con anterioridad en el capítulo 4, hacen que su utilización sea óptima para este tipo de dispositivos.

El uso de un fluido magnetorreológico en actuadores utilizados para rehabilitación como medio de transmisión suave permite la liberación de las articulaciones al instante. De este modo, la respuesta física es adecuada para fines médicos, tales como la rehabilitación de las articulaciones lesionadas, y es también el principio físico del embrague magnetorreológico propuesto.

6.5. Inconvenientes actuadores magnetorreológicos

Las contracciones musculares involuntarias hacen que la estrategia de control sea demasiado complejo para actuadores clásicos. Los espasmos son realmente peligrosos cuando se trata de un robot médico, debido a las inercias y pares de oposición que se transmiten a la articulación humana. Es por esta razón por lo que se desea una respuesta suave y rápida de estos dispositivos, no sólo en términos de software de control sino además en el diseño de los modelos.

Aparte de estos altos requisitos, el peso y dimensión de un dispositivo que trabaja en un exoesqueleto usable, debe ser tan ligero y pequeño como sea posible. Eso significa que las variables más importantes son la fuerza por kilogramo o de la fuerza por volumen de dicho dispositivo. Estas limitaciones hacen que el diseño de los actuadores sea un problema difícil a resolver para encontrar el accionador óptimo para aplicaciones biomédicas.

Los actuadores magnetorreológicos se están haciendo cada vez más populares debido a que no hay necesidad de utilizar excesivas demandas de energía para su control y también ofrecen la fiabilidad de los sistemas pasivos. El principal inconveniente que presentan es el hecho de que la mayor precisión para las demandas de las aplicaciones, la más compleja es la estrategia de control. Esta es la consecuencia de su no-linealidad y el comportamiento de histéresis, por lo que esta es la principal razón por la cual la mayor parte del uso de estos fluidos está dispuesta para fines no precisos, como por ejemplo los dispositivos de amortiguación.

6.6. Etapas de diseño del prototipo

6.6.1. Diseño original

El embrague que se propuso consiste en una forma cilíndrica como se ve en la siguiente figura:

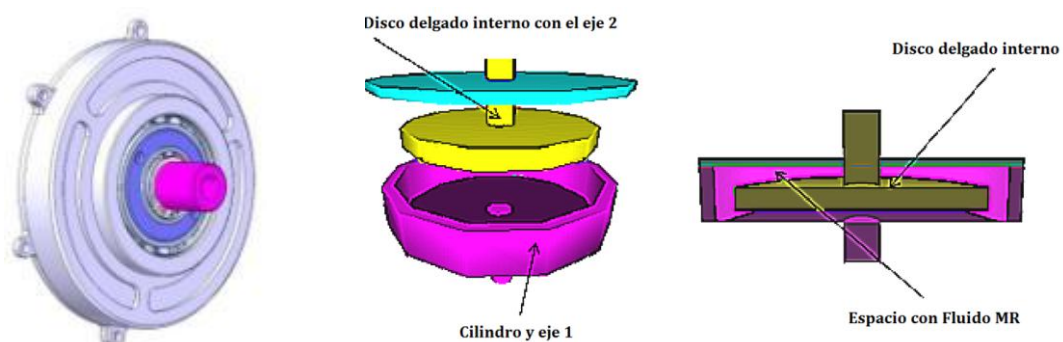


Figura 6.5: Diseño de embrague magnetorreológico propuesto.

La parte exterior de la carcasa está conectada al eje de entrada, y en su interior hay un pequeño disco conectado al eje de entrada y otra al eje de salida, con poca separación entre ellos y la parte de la carcasa. El fluido magnetorreológico se encuentra en el espacio libre. El par de torsión en el eje de salida es obtenido a partir del par que se aplica en el eje de entrada y es transmitido por el fluido magnetorreológico al eje de salida. La viscosidad de este fluido se cambia mediante la modificación de la intensidad del campo magnético aplicado a través del embrague. Como resultado, se obtienen diferentes capacidades de embrague.

6.6.2. Cálculo de par transmitido

El par transmitido al eje de salida para un número variable de discos interiores se calculó utilizando las siguientes ecuaciones [21]:

$$\frac{T_d}{n-1} = \frac{\pi\eta|\Delta\omega|}{h_d} (R_2^4 - R_1^4) + \frac{4}{3} (R_2^3 - R_1^3) \tau_B \quad (6.2)$$

$$T_h = \frac{\pi\eta|\Delta\omega|}{h_d} (R_2^4) + \frac{4}{3} (R_2^3) \tau_B \quad (6.3)$$

$$T_{tot} = T_d + T_h \quad (6.4)$$

Con el fin de simplificar los cálculos, se hacen algunas modificaciones teniendo en cuenta que aproximadamente el 95 % de la superficie del disco interno es eficaz en términos de par transmitido al eje de salida.

T_d es el par transmitido debido a los discos interiores, y T_h es el debido a la carcasa. La suma total depende también del número de discos internos n .

En las expresiones anteriores, η es la viscosidad del fluido sin campo magnético aplicado, y se supone que es un valor constante de 0,3 Pa·s. $|\Delta\omega|$ es la velocidad de rotación relativa entre ambos ejes de entrada y de salida. h_d es la separación entre dos discos interiores consecutivos, y h_h es la separación entre el disco interior más cerca de la parte de la carcasa. R_2 es el radio de disco interior, mientras que R_1 es el radio de eje que los conecta. τ_B es la tensión de fluencia del fluido o ‘Yield Stress’ para el campo magnético aplicado. Para el resto de casos, se supone que el fluido cuando se encuentra magnetizado, está siempre en el mismo punto de fluencia, por lo que este valor se aproxima a una constante que para el resto de cálculos se supone entre 40 y 50 kPa [21].

6.6.3. Simulación del dispositivo original propuesto

Dos fuentes diferentes para la generación de campo magnético fueron utilizadas para analizar el mejor resultado del sistema. Uno de ellos consistió en utilizar un campo magnético generado por una corriente externa, usando una bobina. El otro utilizó imanes de neodimio permanentes, que tiene las ventajas de no utilizar energía eléctrica y se reduce considerablemente el peso al no disponer de bobina de cobre.

Antes de la construcción del prototipo, se desarrollaron varias simulaciones para entender el comportamiento de los fluidos magnetorreológicos y el par transmitido por el embrague (en diferentes configuraciones). Se utilizó el valor de una constante para el campo magnético aplicado en lugar de tantos métodos propuestos.

Debido a la falta o la complejidad de programas de CAD que trabajan directamente con estos fluidos, los desarrolladores utilizaron Matlab-Simulink para simular el comportamiento de ellos en lugar de los programas de CAD

Los datos de los ensayos se detallan en la Tabla 6.1, donde se calculó el par máximo transmitido, basándose en el número y diámetro de los discos interiores, y el diámetro exterior de la carcasa. El peso es el resultado de la suma de embrague y ambos ejes. El material seleccionado para cada cálculo fue Al-Mg 5052 con $2,68 \text{ g/cm}^3$ de densidad.

Number of disks	Inner disk ϕ (cm)	Outer housing ϕ (cm)	Max. torque (Nm)	Weight (g)
1	10	13	38.5	141
1	7	10	12	83
1	6	9	8	61
1	5	8	4.5	48
2	10	13	72	221
2	7	10	25	117
2	6	9	16	90
2	5	8	9	68
3	10	13	103	306
3	7	10	38	157
3	6	9	24	119.68
3	5	8	13	88

Tabla 6.1: Par de transmisión para diferentes configuraciones de embrague y pesos.

Dado que los efectos de este diseño tiene fines de rehabilitación para ayudar a la recuperación de la articulación del codo humano, el par requerido se aproximó a **3,2 N·m** (sin carga). Además, pensando en términos de comodidad portátil y un par máximo de transmisión, para las cargas estimadas, la mejor opción es estimó con un único disco interior y con un diámetro exterior de la carcasa de **10 cm (83 g)**.

Por otro lado, fue seleccionado el motor ultrasónico TRUMA USM-60-RA con un par de **1,5 N·m**, **250 g** de peso, y una velocidad de rotación de **120 rpm**.

Capítulo 7

Software empleado para diseño y simulación

7. Software empleado de diseño y simulación.

7.1.Descripción general.



Figura 7.1: Software utilizado.

Para la elaboración de este proyecto final de carrera, se han utilizado las siguientes herramientas de software:

Podemos categorizar para dos fines distintos los programas de software utilizados:

- Mejora de diseño geométrico:

Para llevar a cabo las mejoras en el sistema de embrague magnetorreológico, se ha utilizado la herramienta **de CAD PTC Creo 2.0**. Mediante este software se ha llevado a cabo la elaboración de las nuevas piezas y las mejoras del diseño original del embrague.

Previamente a **PTC Creo 2.0** ha sido necesaria la utilización de **SolidWorks**, herramienta mediante la cual se encontraban diseñadas las piezas originales del embrague. Con esta aplicación se ha tomado la geometría y dimensiones de las piezas originales del embrague magnetorreológico que han servido de referencia para elaborar el nuevo diseño del embrague con **PTC Creo 2.0**.

- Análisis campos magnéticos:

Para llevar a cabo el análisis de los campos magnéticos generados para poder modificar las propiedades reológicas del fluido, se han utilizado dos herramientas: **Matlab y ANSYS Maxwell**.

La primera de estas herramientas se ha utilizado para analizar de manera analítica los campos magnéticos generados por diferentes dispositivos. Se han desarrollado códigos de programación, elaborado graficas de análisis, obtención de expresiones analíticas para obtener rectas de diseño, etc.

En cuanto a ANSYS Maxwell, se ha utilizado esta herramienta para realizar simulaciones de campos magnéticos generados por diferentes dispositivos y se ha jugado con diferentes materiales con los cuales puede estar fabricado el embrague magnetorreológico. Esta potente herramienta de simulación ha permitido obtener una modelización del comportamiento del fluido magnetorreológico estimulado con campos magnéticos.

Como consecuencia de la utilización de ambos programas, se ha podido trabajar de forma conjunta con datos teóricos obtenido mediante Matlab y datos 'experimentales' realizados mediante simulación con ANSYS Maxwell. De esta manera, los resultados analíticos obtenidos en Matlab servían como punto de referencia para realizar diferentes estudios en Maxwell, realizar comparaciones y obtener conclusiones con una base justificada.

Debido a que los programas que más se han utilizado durante el desarrollo de este proyecto final de carrera han sido PTC Creo 2.0 y ANSYS Maxwell, en los siguiente apartado se va a hablar más en profundidad de ellos, comentando las principales funcionalidades de las que disponen estas potentes herramientas CAD.

7.2. PTC Creo 2.0

[8] Creo es una familia o una suite de software de diseño de productos de apoyo para empresas de manufactura discreta y se desarrolla por parte de la empresa de software Parametric Technology Corporation (PTC). La suite se compone de diferentes aplicaciones, cada una de ellas entrega un conjunto distinto de capacidades para el usuario en el desarrollo de productos.

Creo ejecuta en Microsoft Windows y ofrece aplicaciones para el diseño 2D, 3D CAD paramétrico función de modelado de sólidos, modelado directo 3D, análisis de elementos finitos y simulación, diseño esquemático, ilustraciones técnicas, y la visualización de modelos entre otras muchas funciones.

La actual suite de aplicaciones de Creo reemplazan y sustituyen productos de PTC antes conocido como Pro/ENGINEER, CoCreate, y ProductView.

Aplicaciones Incluidas en PTC Creo 2.0:

PT Creo 2.0 consta de las siguientes nueve aplicaciones:

- *Creo Parametric* es una aplicación de diseño 3D para el modelado paramétrico de piezas y ensamblaje de conjuntos. Creo Parametric proporciona todas las capacidades de Creo Elements/Pro ENGINEER. Es la aplicación utilizada para el modelado y ensamblaje de las piezas del embrague magnetorreológico.
- *Creo Direct* es una aplicación de diseño independiente de ingenieros expertos y no expertos CAD que quieren interactuar directamente con la geometría utilizando un enfoque de modelado directo.
- *Creo Simulate* es la aplicación analista utilizada para la simulación estructural y térmica. Esta aplicación aprovecha la tecnología de Pro/MECHANICA.
- *Creo Layout* es una aplicación de diseño para los ingenieros que desean crear trabajo concepto de diseño en 2D, con la intención de, en última instancia, la evolución del diseño a 3D.
- *Creo Esquemas* es la aplicación para la creación de diagramas de sistemas 2D enrutado, como el cableado y tuberías.
- *Creo Ilustrar* es una aplicación para aquellos que necesitan comunicar conceptos complejos de información de servicio de forma gráfica en 3D. Esta aplicación también se conecta a Abortext.
- *Creo View MCAD* es una aplicación de un peso más ligero para los que quieren ver, interrogar, y marcar la geometría MCAD.
- *Creo View ECAD* es otra aplicación de peso ligero. Pero para su visualización, interrogar, y margen de beneficio de la geometría ECAD.
- *Creo Sketch* es una aplicación de diseño a mano alzada rápidamente una idea de diseño en 2D. Esta aplicación es gratuita.

Las aplicaciones de Creo 2.0 están disponibles en Inglés, alemán, francés, italiano, español, japonés, coreano, chino simplificado y chino tradicional.

Creo es parte del sistema de desarrollo de productos más amplia llevada a cabo por PTC. Se conecta a otras soluciones de PTC que sirven de apoyo para desarrollo de productos, incluyendo Windchill de Product Lifecycle Management (PLM), Mathcad para realizar cálculos de ingeniería y software de publicación Arbortext para la empresa.

Antecedentes y productos previos:

La empresa Parametric Technology Corporation (PTC), fue fundada en 1985, y apareció por primera vez en el mercado en 1988 con el paquete de software de diseño CAD Pro/ENGINEER. El famoso fabricante de maquinaria agrícola John Deere fue el primer cliente en adquirir la aplicación.

A partir de este lanzamiento de Pro/ENGINEER, PTC ha ido evolucionando su paquete de software de diseño hasta la versión más actual, PTC Creo 3.0. Las versiones desarrolladas por PTC de forma cronológica son las siguientes:

- Pro ENGINEER 1-20
- Pro ENGINEER 2000i
- Pro ENGINEER 2000i2
- Pro ENGINEER 2001
- Pro ENGINEER Wildfire
- Pro ENGINEER Wildfire 2.0
- Pro ENGINEER Wildfire 3.0
- Pro ENGINEER Wildfire 4.0
- Creo 1.0
- Creo 2.0
- Creo 3.0

Áreas de aplicación en la industria:

PTC Creo es el programa de utilización más común en la industria del automóvil para la construcción de componentes de la transmisión, la maquinaria y las industrias de bienes de consumo. Entre los usuarios más grandes y mejor conocidas de PTC Creo incluyen ABB, Robert Bosch GmbH, STIHL, BMW AG, Siemens, Asea Brown Boveri, Ferrari, Festo, John Deere, Toyota, Motorola, Harley-Davidson, Omega, Boeing, Schindler Ascensores Bucher Hidráulica, Liebherr, Audi, Volkswagen, Porsche, Palfinger AG, Tognum AG, ZF Friedrichshafen, grupo de SMS, Endress + Hauser y EGSTON.

7.2.1. PTC Creo Parametric 2.0

7.2.1.1. Descripción general

PTC Creo Parametric es un conjunto de herramientas eficaz y ampliable para el diseño de productos 3D con la potencia, flexibilidad y rapidez que ayudan a agilizar el proceso de desarrollo de productos. Todos los objetos están contruidos en tres dimensiones y, a continuación derivan en dibujos o más objetos ensamblados en conjuntos.

Las características especiales de Creo Parametric son las siguientes:

- Completamente paramétrico: Todas las geometrías están totalmente dimensionados, un cambio en un valor de dimensión provoca un cambio correspondiente en la geometría.
- Asociativa bidireccional: un modelo de cambios que hace que se actualicen en todas las aplicaciones del modelo, tales como montaje, dibujo, o derivan modelo NC. Un cambio en un valor de cota en el dibujo derivado a su vez hace que el cambio de modelo 3-D subyacente.
- Elementos basados en la construcción: los modelos se construyen a partir de diseños y fabricación de elementos típicos.
- Creación rápida y fácil de modelos CAD 3D a partir de cualquier pieza o conjunto.
- Creación de planos de mecanizado automáticamente con total seguridad de que siempre reflejarán el diseño 3D actual.
- Permite mejoras en la estética del diseño con prestaciones completas de creación de superficies.
- Reutilización con facilidad de datos CAD neutros y de sistemas ajenos a PTC de clientes y proveedores, y sin necesidad de convertir ficheros o volver a crear modelos CAD 3D desde el principio.
- Se ejecuta en el sistema operativo Windows, y IRIX, HP-UX y Solaris para sistemas de 32 y 64 bits. El soporte para Linux fue descontinuado a partir de la versión de Pro / ENGINEER Wildfire 4.0.

Creo Parametric permite guardar los diseños de piezas realizados en los siguientes formatos:

- .prt (Parte): extensión de los componentes individuales
- .asm (asamblea): extensión de los módulos
- .drw (Dibujo): extensión de los dibujos
- .frm (formato): extensión de los formatos de dibujo
- .lay (diseño): extensión de los diseños de dibujo

Principales funciones de Creo Parametric 2.0:

- Modelado de piezas y conjuntos
- Planos de mecanizado
- Superficies de forma libre y técnicas
- Modelado de chapa
- Diseño de estructuras y soldadura
- Análisis estructural
- Diseño de mecanismos
- Fotorrealismo y animación de diseños
- Importación y reparación de datos
- Completa biblioteca de piezas, funciones, herramientas, etc.

7.2.1.2. Entorno de trabajo Creo Parametric 2.0

En este apartado, se va a analizar el entorno de trabajo que ofrece Creo Parametric 2.0 [19] y las diferentes opciones que nos proporciona:

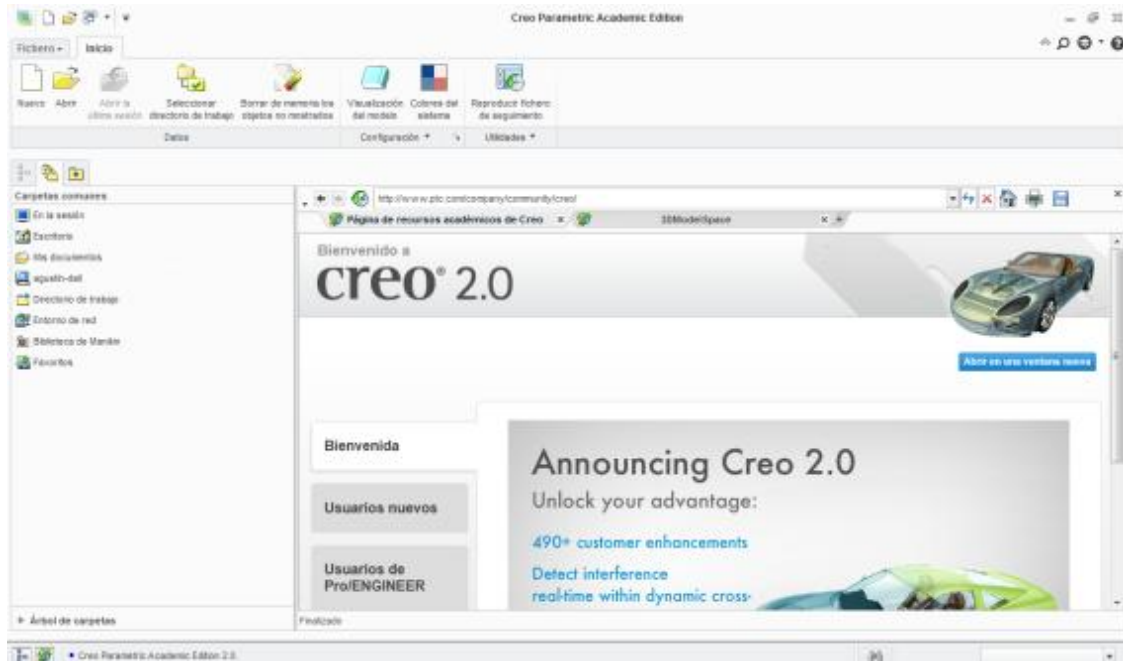


Figura 7.2: PTC Creo Parametric 2.0.

La interfaz principal incluye las siguientes áreas:

- Ventana Gráfica
- Barra de acceso rápido
- Barra de herramientas
- Tabla de instrumentos
- Barra de estado
- Registro de mensajes
- Cuadros de dialogo
- Barra de gráficos
- Menú de gestión

Ventana principal Creo Parametric 2.0:

La ventana principal de Creo Parametric para el desarrollo de piezas y ensamblajes muestra el siguiente aspecto:

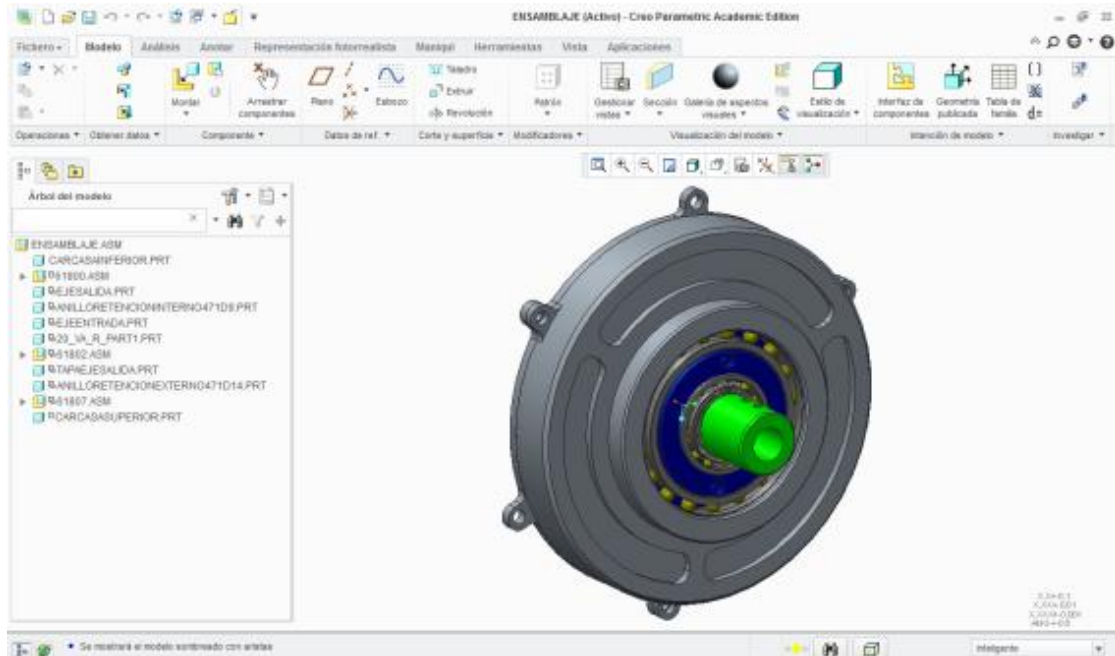


Figura 7.3: Interface principal Creo Parametric 2.0.

Pasamos a describir las opciones que ofrecen cada una de las ventanas y barras de herramientas visualizadas en la interface principal de la aplicación:

- **Ventana Gráfica:**

Es el área de trabajo de Creo Parametric 2.0 en el cual se crean y se modifican los modelos realizados como partes, ensamblajes o planos.

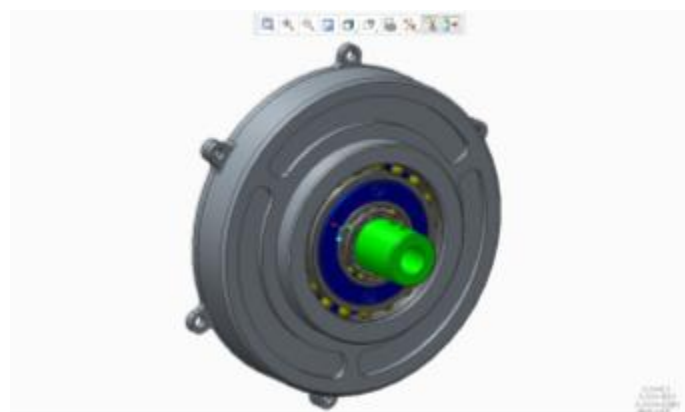


Figura 7.4: Ventana gráfica.

- Barra de gráficos:

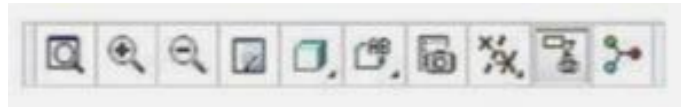


Figura 7.5: Barra de gráficos.

Esta barra se encuentra localizada en la parte superior de la ventana gráfica y contiene las herramientas y filtros para el área de trabajo de la ventana gráfica más comunes. Se pueden caracterizar las herramientas y los filtros mostrados en la barra de gráficos.

- Barra de Acceso Rápido:



Figura 7.6: Barra de gráficos.

Por defecto, la barra de acceso rápido está localizada en la parte superior de la ventana principal de Creo Parametric 2.0. Contiene el conjunto de comandos de uso común que son independientes de la ficha que aparece en la barra de herramientas. Estos comandos están disponibles independientemente del modo específico o barra de herramientas en la que se esté trabajando. Se puede modificar la barra de acceso rápido y añadir comandos adicionales.

- Barra de Herramientas:



Figura 7.7: Barra de herramientas.

Consiste en un menú contextual a través de la interfaz que contiene la mayoría de los comandos usados de manera habitual en Creo Parametric 2.0 (extrusiones, taladrados, introducción de planos o puntos de referencia, etc.). La barra de herramientas organiza los comandos en tareas lógicas a través de pestañas y grupos.

- Tabla de Instrumentos:

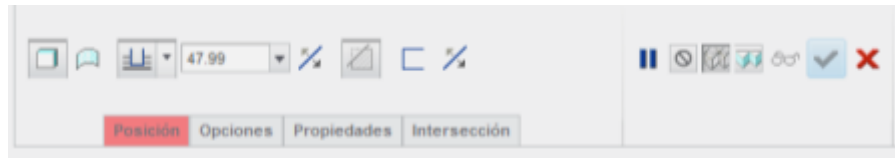


Figura 7.8: Tabla de instrumentos.

La tabla de instrumentos se encuentra localizada en la parte superior de la interfaz. Esta tabla de instrumentos aparece cuando se crea o se edita la definición de características de piezas o ensamblajes. Esta tabla, ofrece al usuario el control, entradas de características o dimensiones, estados y orientación para realizar las tareas. Los cambios que se realicen en la pieza en cuestión son visibles de manera inmediata en la ventana gráfica en la cual se encuentra la pieza en cuestión. Hay varias tablas de instrumentos disponibles con opciones funcionales distintas en función de los trabajos a realizar en la pieza. Los iconos situados a la izquierda incluyen control de características de edición de la pieza mientras que los iconos situados a la derecha, permiten hacer operaciones tales como pre visualizaciones o cancelar la edición de la pieza sobre la que se está trabajando.

- Cuadros de dialogo:

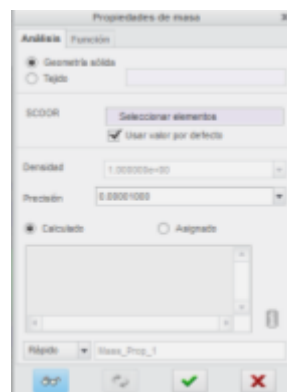


Figura 7.9: Cuadro de dialogo.

Este tipo de cuadros, proporcionan información adicional de manera rápida al usuario sobre las operaciones que esté realizando. El ejemplo de la imagen da información acerca de las propiedades de masa de una pieza.

- Árbol del Modelo:

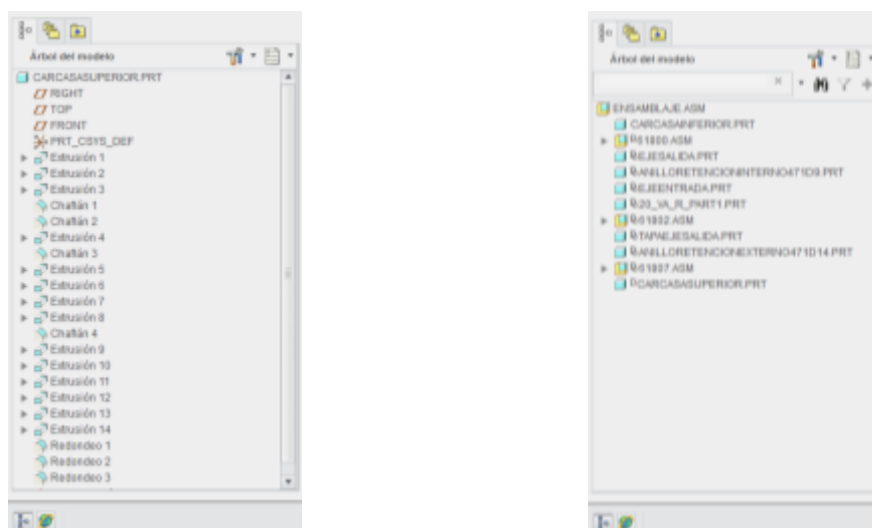


Figura 7.10: Árbol de modelo.

En esta ventana situada en la parte izquierda de la interface, se visualizan las operaciones realizadas sobre una pieza como muestra la imagen de la izquierda o las piezas que forman parte del ensamblaje de un conjunto como es el caso de la figura de la derecha.

- Barra de Estado:



Figura 7.11: Barra de estado.

Se encuentra localizada en la parte inferior de la ventana principal de Creo Parametric 2.0, y fundamentalmente ofrece información sobre el estado de la pieza, realiza indicaciones para finalizar una determinada operación, permite hacer regeneraciones del modelo, etc.

7.3.ANSYS Maxwell

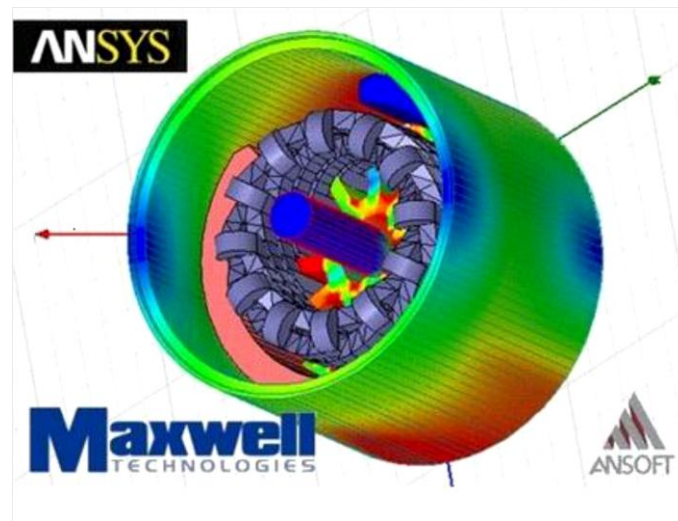


Figura 7.12: Imagen del simulador ANSYS Maxwell.

[14] [15] ANSYS Maxwell es un software de simulación de campo electromagnético para los ingenieros encargados de diseñar y analizar los dispositivos electromecánicos, como motores, actuadores, sensores y transformadores, bobinas de 3-D y 2-D electromagnéticas. Maxwell utiliza el método de los elementos finitos para resolver estática, dominio de la frecuencia, y variable en el tiempo los campos electromagnéticos y eléctricos. Un beneficio clave de ANSYS Maxwell es su proceso de solución automatizada, para lo cual es necesario que se especifique sólo la geometría, las propiedades del material y la salida deseada. Desde este punto, Maxwell genera automáticamente una malla adecuada, eficiente y precisa para resolver el problema.

Esta adaptación automática elimina la complejidad del proceso de análisis y le permite beneficiarse de un fácil de utilizar el flujo de diseño altamente eficiente.

Una característica clave en ANSYS Maxwell es la capacidad de generar, modelos de orden reducido de alta fidelidad de la solución de elementos finitos para el uso en ANSYS Simplorer, el software de simulación del sistema multidominio de ANSYS. Esta capacidad crea un poderoso caudal de diseño electromagnético basado que le permite combinar circuitos complejos con modelos de componentes precisos de Maxwell para el diseño de sistemas electrónicos de potencia completos de alto rendimiento electromecánico.

7.3.1. Elección de la herramienta de simulación.

Una vez observadas las características y las soluciones que nos presentan los simuladores citados, para este proyecto se va a utilizar ANSYS Maxwell versión 16.0, este simulador presenta una serie de ventajas sobre los demás como la interfaz que utiliza, el modelado en 2D y 3D, es un programa complejo pero que cuenta con una serie de tutoriales y guías de fácil interpretación y manejo que ayudarán a conseguir los objetivos propuestos.

7.3.2. Tutorial ANSYS Maxwell Versión 16.0

Una vez elegido el simulador, elaboraremos una serie de guías o tutoriales básicos para el manejo del programa en función de los objetivos que se pretende alcanzar. Para ello, han servido como guía el manual de instrucciones del ANSYS Maxwell y en imágenes del propio software.

El programa es potente y complejo. De modo que nos centraremos en dar unas pautas de como dibujar geometrías, cambiar sus formas y dimensiones, elegir y cambiar los materiales de los cuales están compuestos los dispositivos, así como de la simulación y otras funciones del software necesarias para conseguir nuestros objetivos.

A continuación, se muestra una imagen del escritorio de trabajo del programa, donde mostramos las partes principales para empezar a familiarizarnos con él.

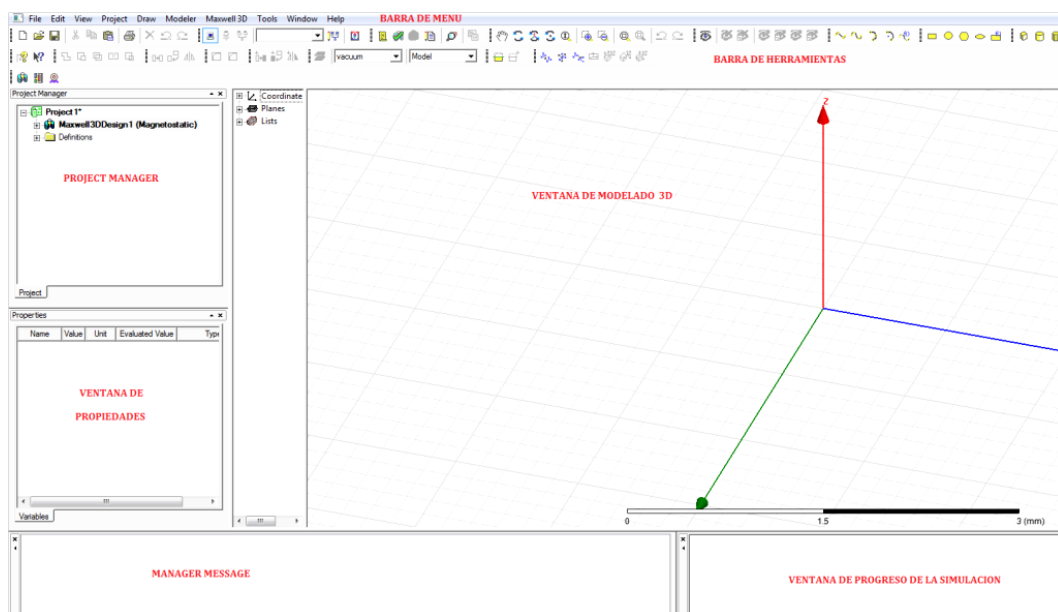


Figura 7.13: Imagen del escritorio de trabajo de ANSYS Maxwell.

Como ya he ha explicado antes, la simulación puede realizarse tanto en dos dimensiones como en tres dimensiones, lo único que cambiaría en el cado de dos son los ejes en la pantalla de modelado.

7.3.3. Configuración del Diseño.

Un proyecto es la colección de uno o más diseños que se guarda bajo una única extensión *mxwl*. Automáticamente se crea un proyecto cuando se ejecuta por primera vez el simulador.

El primer paso para la configuración de un proyecto en Maxwell es añadir un diseño al proyecto activo.

7.3.3.1. Abrir Maxwell y guardar un Nuevo Proyecto.

Para abrir Maxwell y guardar un proyecto:

- Doble-clic en el icono Maxwell16.0 del escritorio de Windows.
- Para insertar un diseño. Clic en Project y seleccionar uno de los siguientes:
 - Insert Maxwell 3D Design.
 - Insert Maxwell 2D Design.
 - Insert RMxpert Design.

La siguiente figura muestra una imagen de los pasos previos que se debe realizar para la correcta inserción de un diseño nuevo al proyecto creado.

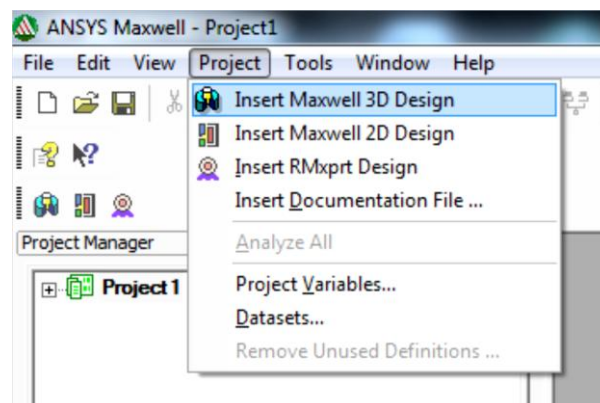


Figura 7.14: Tipos de diseño.

Un nuevo diseño aparecerá en el Project Manager. Será nombrado como *Maxwell3DDesignn*, *Maxwell2DDesignn*, o *RMxprrtDesignn* por defecto, donde n es el número correspondiente al orden en el que se ha añadido al diseño. En este ejemplo se ha elegido un diseño en 2D.

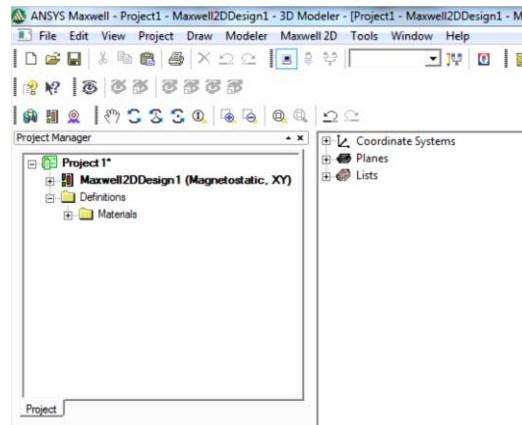


Figura 7.15: Creación de un nuevo proyecto.

La ventana de modelado aparecerá a la derecha del Project Manager. Ahora se puede crear un modelo geométrico. En este ejemplo se ha elegido un diseño en dos dimensiones.

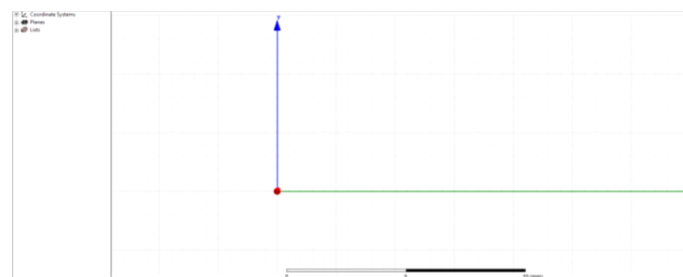


Figura 7.16: Ventana de modelado.

Se debe guardar y renombrar tanto el proyecto como los diseños que se han creado.

- Clic File> Save As. Aparecerá el cuadro de dialogo.
- Localiza y selecciona la carpeta en la que se desea guardar el proyecto.
- Nombrar el proyecto y guardar en la carpeta seleccionada.
- Ahora hay que renombrar el diseño. Clic derecho en *Maxwell2DDesign1* > Rename, y se renombra con el mismo nombre que el proyecto. De esta forma el diseño y el proyecto tendrán el mismo nombre.

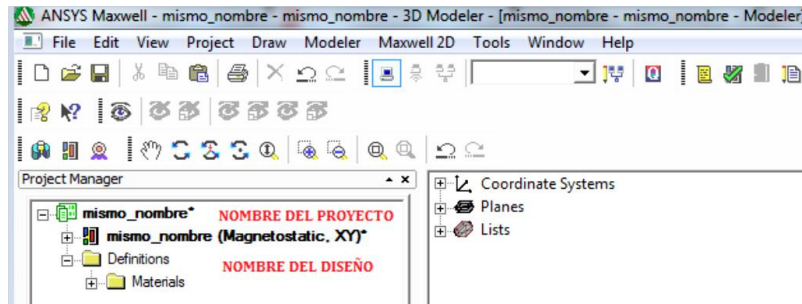


Figura 7.17: Creación de un nuevo diseño.

7.3.3.2. Especificar el Tipo de Solución.

Como se mencionó en la introducción, se dispone de múltiples tipos de soluciones, en función una aplicación específica.

- Clic Maxwell2D o Maxwell3D de la barra de menú según sea el caso > Solution Type. El cuadro de dialogo del tipo de soluciones aparecerá.
- Se muestra los tipos de soluciones disponibles.
- Clic OK.

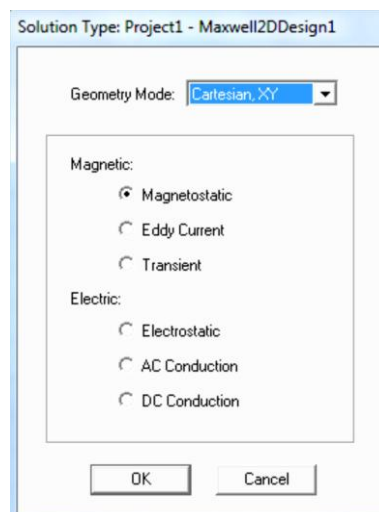


Figura 7.18: Tipos de soluciones para los proyectos.

En el cuadro Geometry Mode es posible cambiar las coordenadas de trabajo en función de las condiciones que tenga nuestro diseño.

7.3.3.3. Configuración de unidades.

Maxwell permite configurar las unidades en las que se desea trabajar.

- Clic Modeler > Units.
- Seleccionar una opción.
- Clic OK.

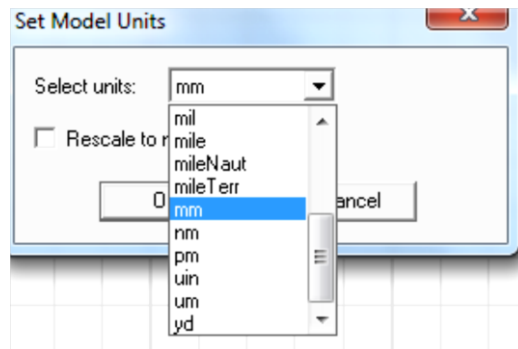


Figura 7.19: Unidades disponibles.

7.3.4. Modelado Geométrico.

- En la barra de Menú aparece el comando Draw para dibujar las diferentes figuras u objetos que necesitamos.
- También está la opción dibujarlas por coordenadas, o por las dimensiones características de cada figura como el área, perímetro, diámetro o radio.
- En la tabla de atributos se puede cambiar el nombre, el color, la transparencia del objeto o el material del que esté compuesto.

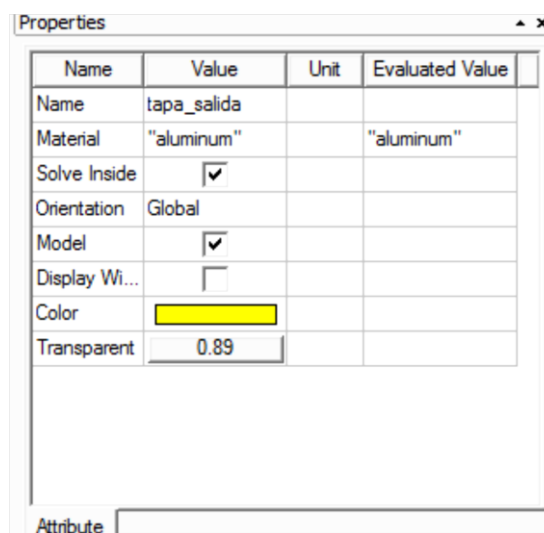


Figura 7.20: Tabla de atributos.

El modelado geométrico es una de las partes más complejas del simulador, para ello Maxwell ofrece una gran variedad de comandos y operaciones como cortar, duplicar, sumar o restar objetos con el fin de facilitar el trabajo. Para una información más detallada de estas operaciones se podemos consultar en el Manual de instrucciones de ANSYS Maxwell 16.0.

7.3.5. Asignar materiales a los objetos.

El poder asignar el tipo de material a cada objeto permitirá obtener resultados más óptimos para el funcionamiento del embrague. Para acceder a la base de datos de los materiales, se debe seleccionar el objeto en el desplegable de la pantalla del modelado.

- Clic derecho > Properties. Aparecerá la tabla de atributos.
- En el cuadro donde se especifica el material, Material, seleccionar Edit.

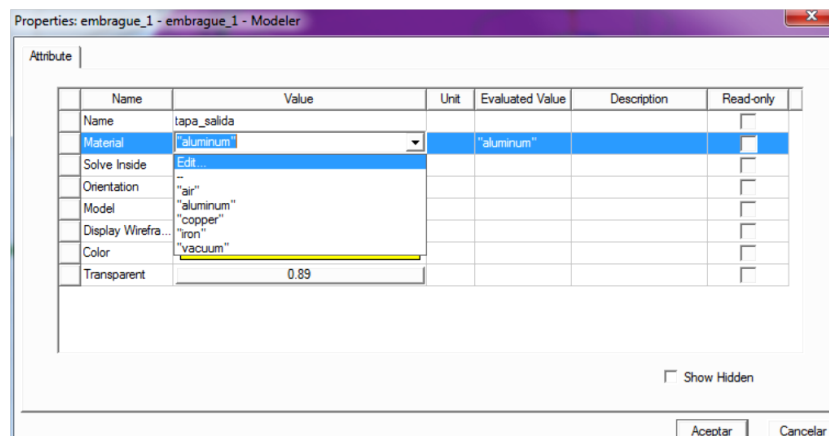


Figura 7.21: Tabla de atributos. Modificación de materiales.

Tabla de la base de datos de los materiales disponibles en la versión de ANSYS Maxwell 16.0.

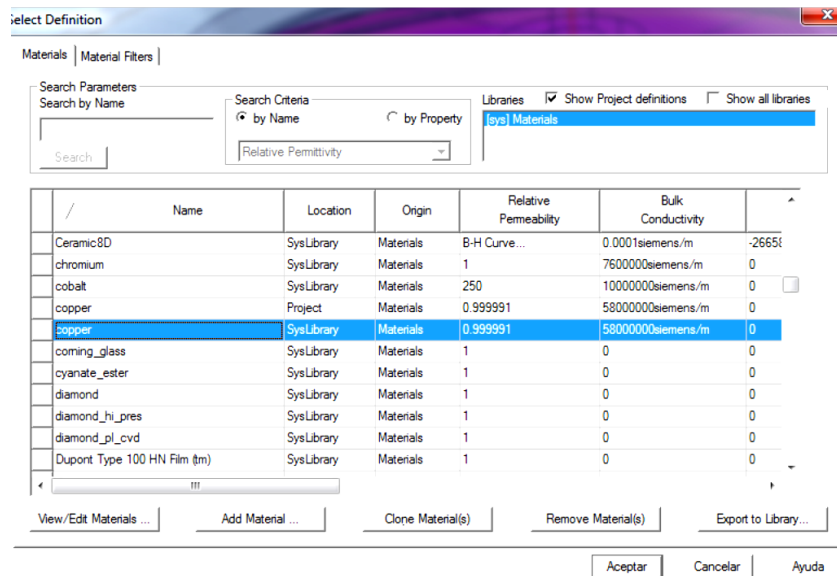


Figura 7.22: Tabla de la base de datos de los materiales.

Una vez encontrada la base de datos, se puede cambiar los materiales de los objetos, Maxwell nos permite incluso introducir un material nuevo si se conocen sus propiedades correspondientes como la permeabilidad relativa, propiedades conductivas o propiedades magnéticas.

7.3.6. Asignar Límites y Excitaciones.

Para cada proyecto, es necesario asignar los límites y las excitaciones. Para los diseños en 3D, sepuede utilizar el simulador para realizar lo siguiente:

- Definir las condiciones de frontera que controlan la forma en que el campo eléctrico o magnético se comporta en las caras de objetos, planos de simetría y la periodicidad y en los bordes de la región problema.
- Definir las excitaciones de tensión, carga, bobina, y corriente.
- Identificar los conductores en los que se inducen corrientes de Foucault.
- Para los proyectos transitorios magnéticos, configurar una conexión de bobinado y un circuito externo.
- Cada solucionador de campo requiere que se especifique excitaciones de los campos y las referencias eléctricas o magnéticas para el cálculo de estos campos.

Cada solucionador de campo requiere que se especifique excitaciones de los campos y las referencias eléctricas o magnéticas para el cálculo de estos campos.

- Límites y excitaciones magnetostáticas.
- Límites y excitaciones electrostáticas.
- Límites y excitaciones de la conducción de CC.
- Editar Límites y excitaciones actuales.
- Los límites transitorios y excitaciones.
- Límites y excitaciones eléctricas transitorias.

Se debe especificar al menos una de las condiciones de contorno o excitaciones que figuran en estas secciones, para que el simulador pueda calcular los valores exactos de los campos y sus parámetros.

Como ejemplo, se asignará la corriente a una bobina que previamente ha sido creada. Se puede seleccionar en el desplegable de la ventana de modelado.

- Clic Maxwell 2D o Maxwell 3D según sea el caso >Excitations>Assign> Current.
- En el cuadro de dialogo de la corriente se introduce su valor en amperios por vuelta. Por ejemplo si son 2 amperios y 250 vueltas, se debe poner 400 A como valor.
- Con Swap Direction se puede elegir el sentido de la corriente, puede ser positiva o negativa.
- Clic OK para completar el proceso de asignación.

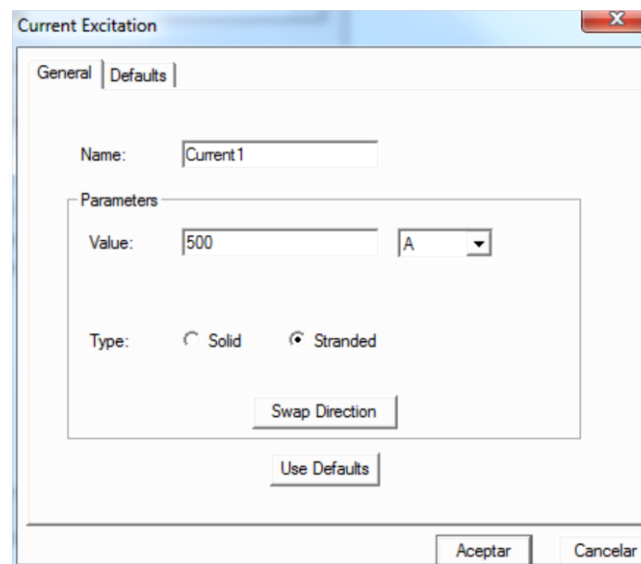


Figura 7.23: Añadir excitaciones. Por ejemplo la corriente.

La corriente aparecerá en la lista de las Excitations en la ventana del Project Manager y por defecto se nombrará Current1.

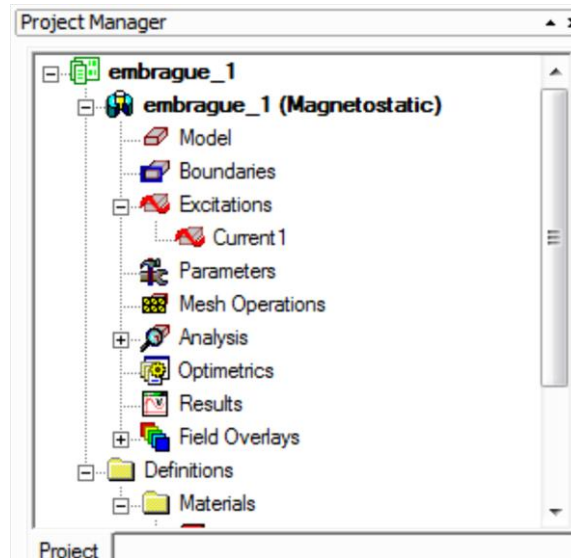


Figura 7.24: Asignación de excitaciones al proyecto.

7.3.7. Configuración y Ejecución de un Análisis.

Configuración del análisis.

Para configurar un análisis:

- Clic derecho en Analysis en el Project Manager.
- Seleccionar Add Solution Setup.
- Clic en la opción General.
- Acepte los valores por defecto.
- Clic OK.

Ejecución de un análisis.

Para ejecutar un análisis:

- Clic derecho en Analysis en el Project Manager.
- Seleccionar Analyze All.
- Una vez terminada la simulación se puede consultar los resultados.

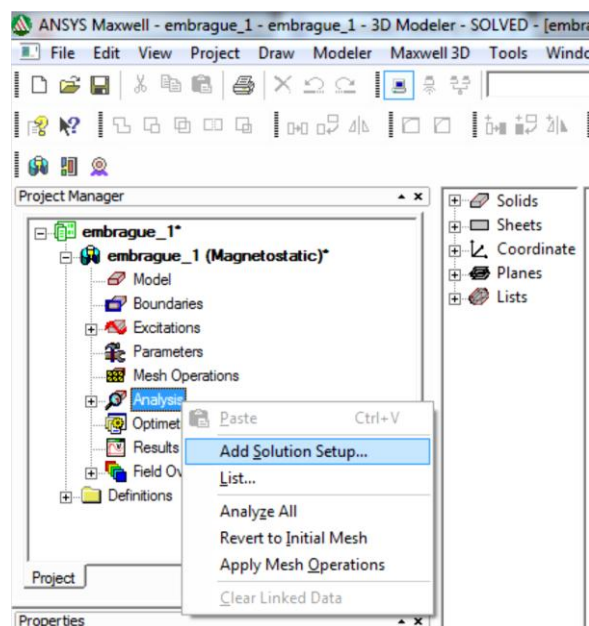


Figura 7.25: Ejecución de un análisis.

Se puede visualizar los resultados de una simulación mediante tablas o graficas de los campos o magnitudes que se desea estudiar. En la figura 7.25, se observa la magnitud del campo magnético en distintas zonas del objeto de análisis.

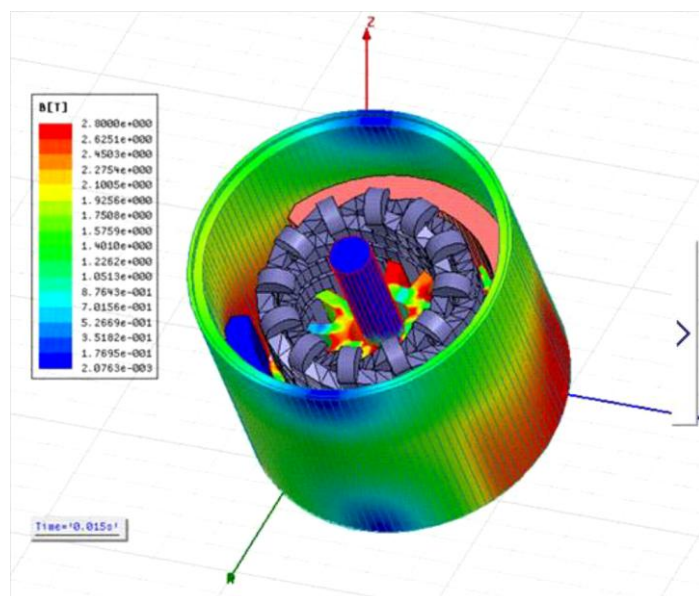


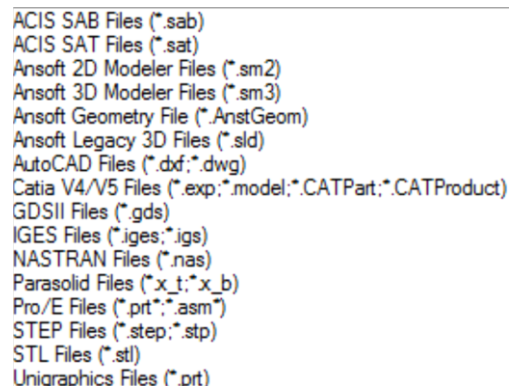
Figura 7.26: Resultados de una simulación.

7.3.8. Importación de archivos a ANSYS Maxwell.

Una de las ventajas que llevo a elegir este programa, es la posibilidad de trabajar con modelos creados en otros simuladores CAD, dando así, la facilidad para modificar o mejorar el diseño del dispositivo.

Para realizar la simulación sobre un modelo realizado en otro software debemos importar el diseño para trabajar sobre él.

Ansyz Maxwell permite importar diseños realizados en otros simuladores como Solid Edge, Autocad, Solidworks etc. Pero debemos tener en cuenta los formatos que son compatibles para la importación.



ACIS SAB Files (*.sab)
ACIS SAT Files (*.sat)
Ansoft 2D Modeler Files (*.sm2)
Ansoft 3D Modeler Files (*.sm3)
Ansoft Geometry File (*.AnstGeom)
Ansoft Legacy 3D Files (*.sld)
AutoCAD Files (*.dxf;*.dwg)
Catia V4/V5 Files (*.exp;*.model;*.CATPart;*.CATProduct)
GDSII Files (*.gds)
IGES Files (*.iges;*.igs)
NASTRAN Files (*.nas)
Parasolid Files (*.x_t;*.x_b)
Pro/E Files (*.prt;*.asm)
STEP Files (*.step;*.stp)
STL Files (*.stl)
Unigraphics Files (*.prt)

Figura 7.27: Formatos compatibles con ANSYS Maxwell.

Para importar un modelo 3D:

- Clic Modeler > Import.
- Seleccione un tipo de archivos compatible.
- Use el buscador para encontrar el archivo que se desea importar.
- Seleccione el modelo 3D o introduzca su nombre en el cuadro de búsqueda.
- Clic Open.

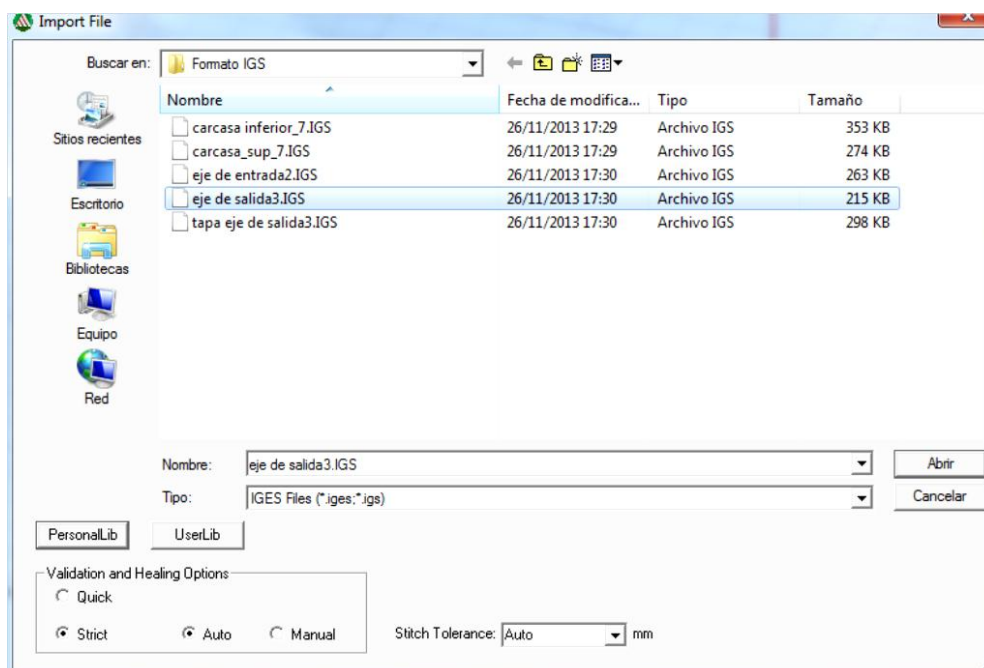


Figura 7.28: Importar un archivo.

Ahora aparecerá el archivo importado y se puede visualizar y modificar en la ventana de modelado del simulador. La figura siguiente muestra un modelo importado con extensión *igs*, construido con otro software.

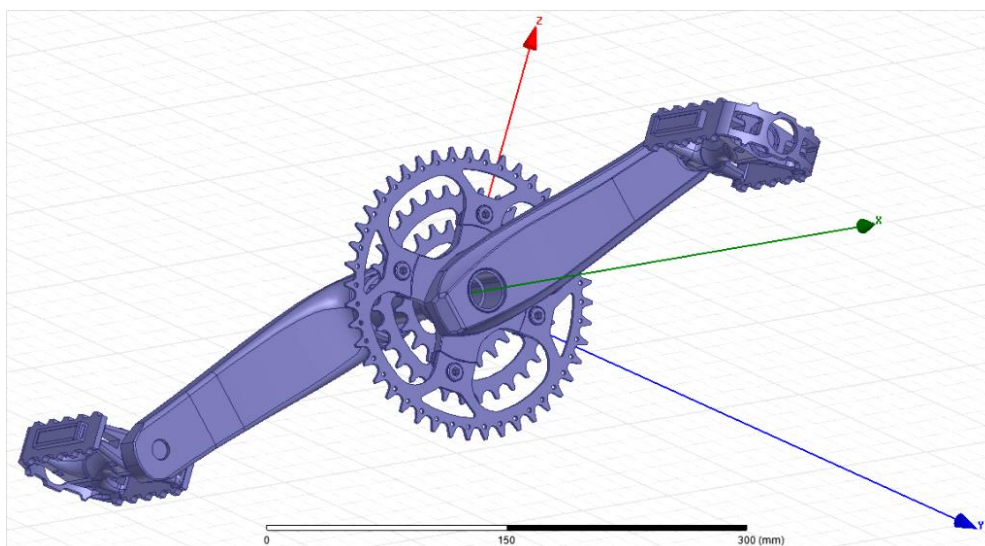


Figura 7.29: Modelo importado a ANSYS Maxwell.

Los modelos construidos con la extensión de archivos *igs*, al importarlos a Maxwell, mantienen todas sus características y medidas iniciales. No ha sido así con otro tipo de archivos que se ha importado, por lo que se recomienda el uso de esta extensión como origen del modelo.

7.5. SolidWorks.

Como ha sido mencionado en el apartado 7.1 de este capítulo, la principal utilidad que ha tenido este programa durante el desarrollo de este proyecto final de carrera ha sido establecer las bases para modelar las piezas en PTC Creo 2.0.

Los compañeros del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática realizaron el diseño original de las piezas con esta aplicación CAD y por tanto, ha sido el punto de partida con el que se ha podido conocer la geometría de las piezas y sus dimensiones y de esta manera poder modelar y mejorar el diseño con PTC Creo 2.0.

Tiene una dinámica de funcionamiento muy similar a PTC Creo 2.0., por este motivo y porque ha sido una herramienta poco utilizada en este proyecto, no se entra en más detalle sobre su manejo. La siguiente figura muestra su interface principal:

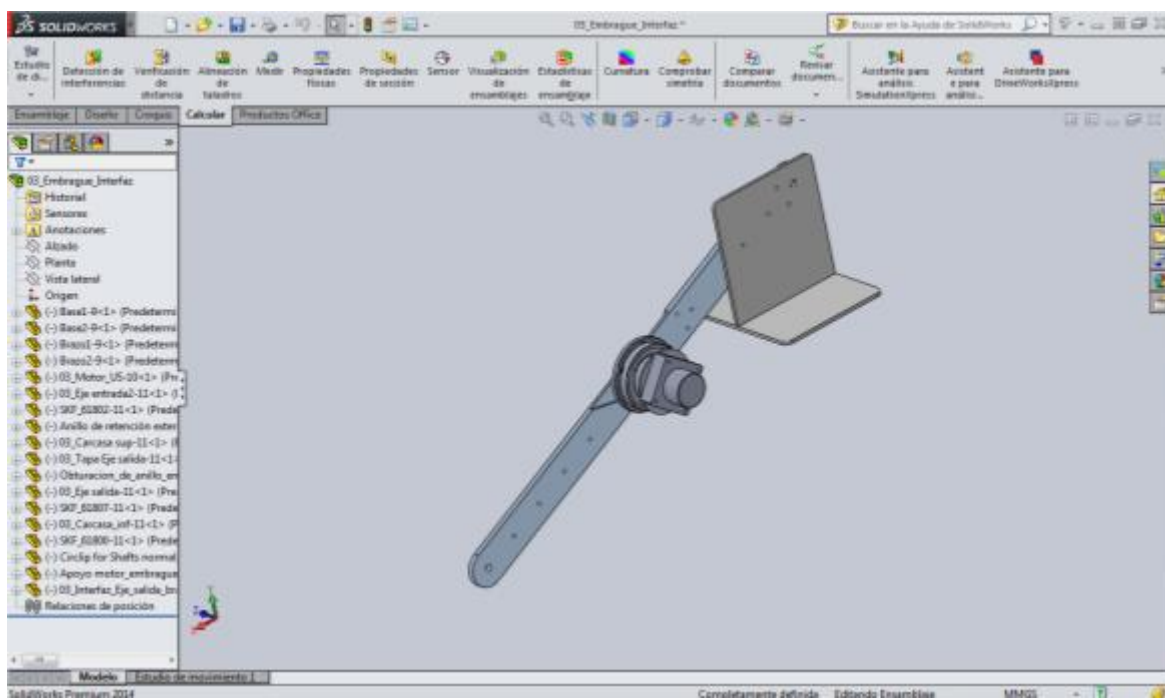


Figura 7.31: Interface principal de SolidWorks.

Capítulo 8

Desarrollo y ensamblaje en Creo Parametric 2.0

8. Desarrollo y ensamblaje en Creo Parametric 2.0

8.1. Desarrollo de piezas

En este apartado de la memoria, se procederá a analizar cómo han sido diseñadas cada una de las piezas que componen el embrague magnetorreológico original en PTC Creo Parametric 2.0 en lugar de en SolidWorks como estaban realizadas en primer lugar.

Varias piezas han sido realizadas tomando como referencia los modelos de las piezas originales proporcionadas por el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática diseñados en SolidWorks. Para la realización del resto de piezas, se ha procedido a buscar en la página web del fabricante correspondiente (generalmente SKF) los modelos CAD adecuados para Creo Parametric 2.0 de las piezas en cuestión.

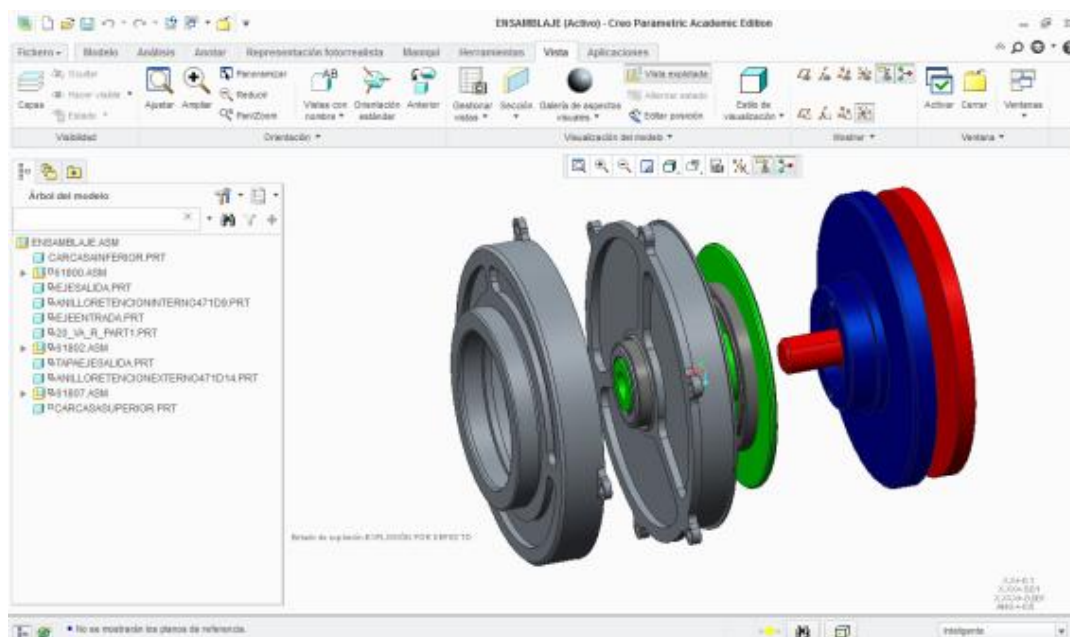


Figura 8.1: Vista extendida piezas embrague magnetorreológico.

Las piezas que componen el embrague magnetorreológico son las siguientes:

Carcasas

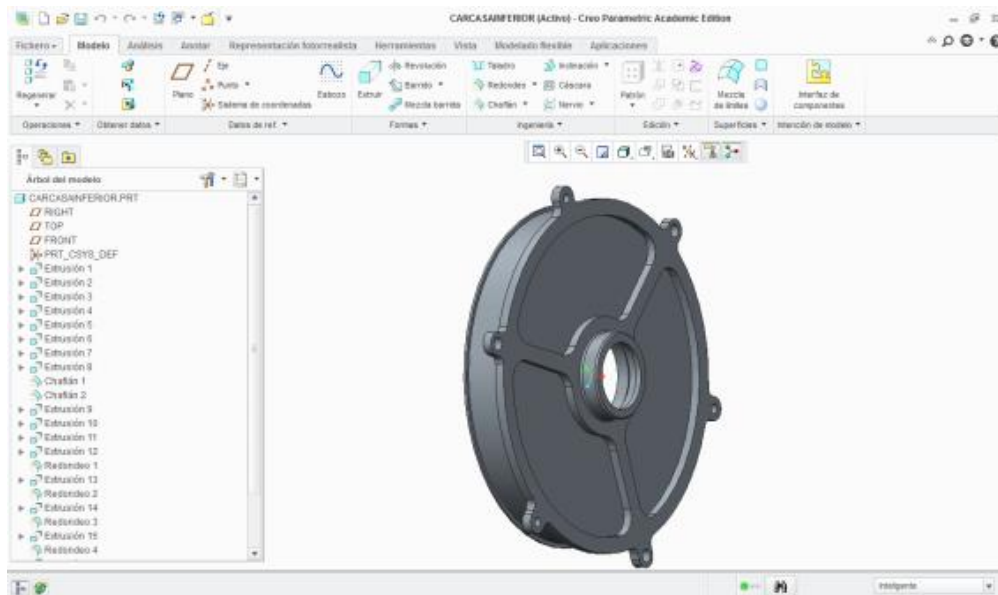


Figura 8.2: Carcasa inferior diseño original.

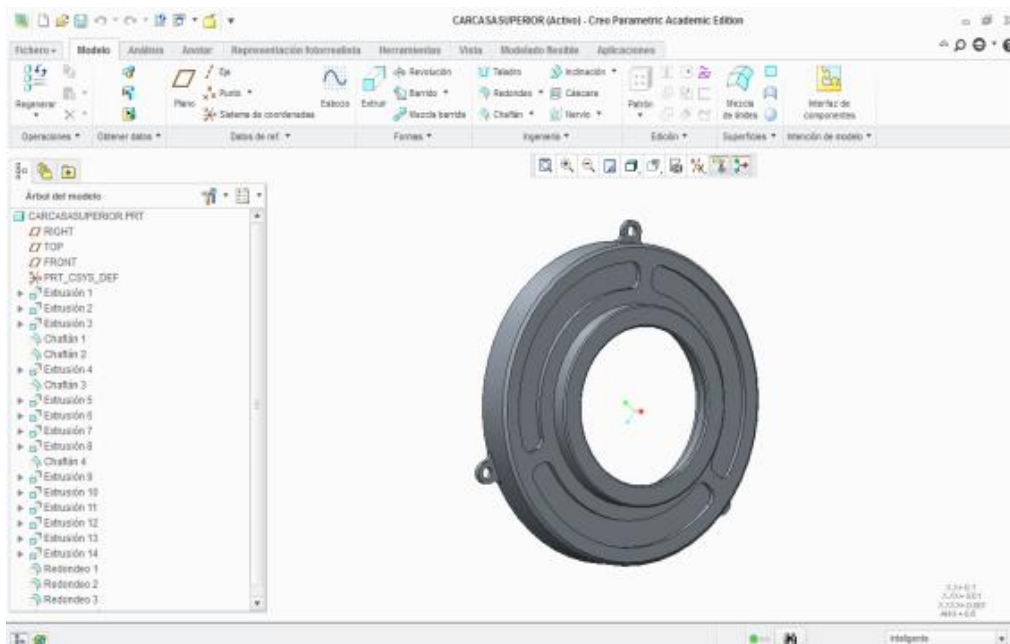


Figura 8.3: Carcasa superior diseño original.

Fundamentalmente han sido realizadas mediante extrusiones con los diámetros y espesores necesarios para dar con la geometría final de la pieza. Las ranuras de la superficie también están realizadas mediante extrusiones, cuya forma a sido realizada a través de las coordenadas de los puntos en los cuales se produce un cambio de curvatura.

Por último, las pestañas exteriores para unir ambas carcasas exteriores, están realizadas por extrusión y posterior redondeado.

Todo los diámetros tienen una tolerancia de ± 0.25 mm. Para más detalles sobre la geometría, se adjuntan los archivos CAD.

Rodamientos

Los archivos CAD de estos rodamientos han sido descargados de la página web de SKF [12], con las dimensiones requeridas para el diseño. Se trata de rodamientos rígidos de bolas, con una única hilera de bolas.

A continuación se adjuntan los modelos y hojas de características con las principales dimensiones de cada rodamiento en cuestión:

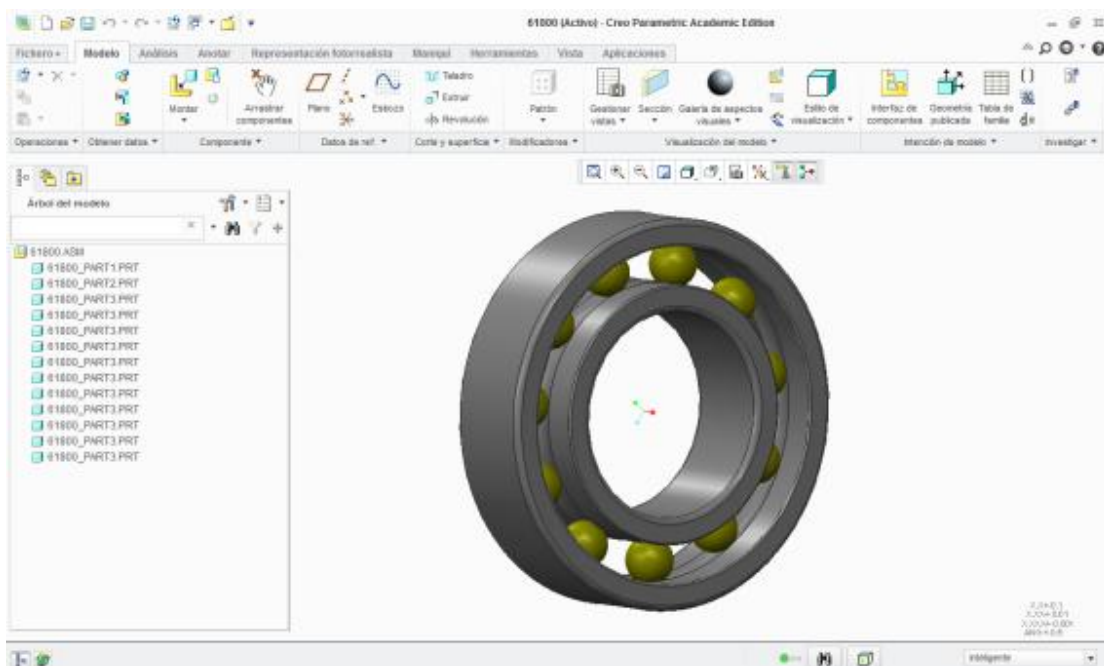


Figura 8.4: Rodamiento 61800.

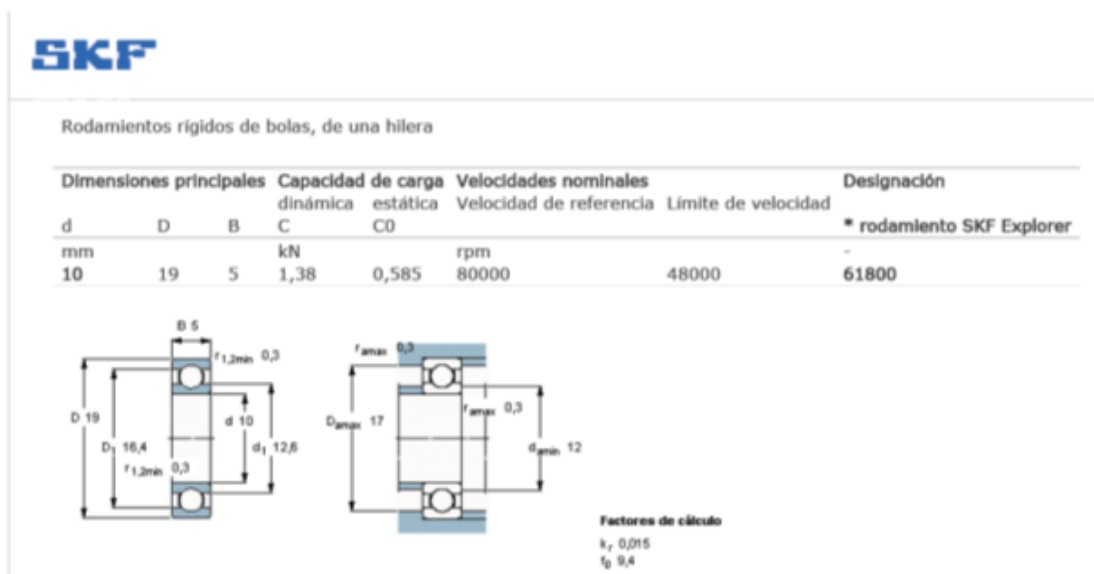


Figura 8.5: Características rodamiento de bolas SKF 61800.

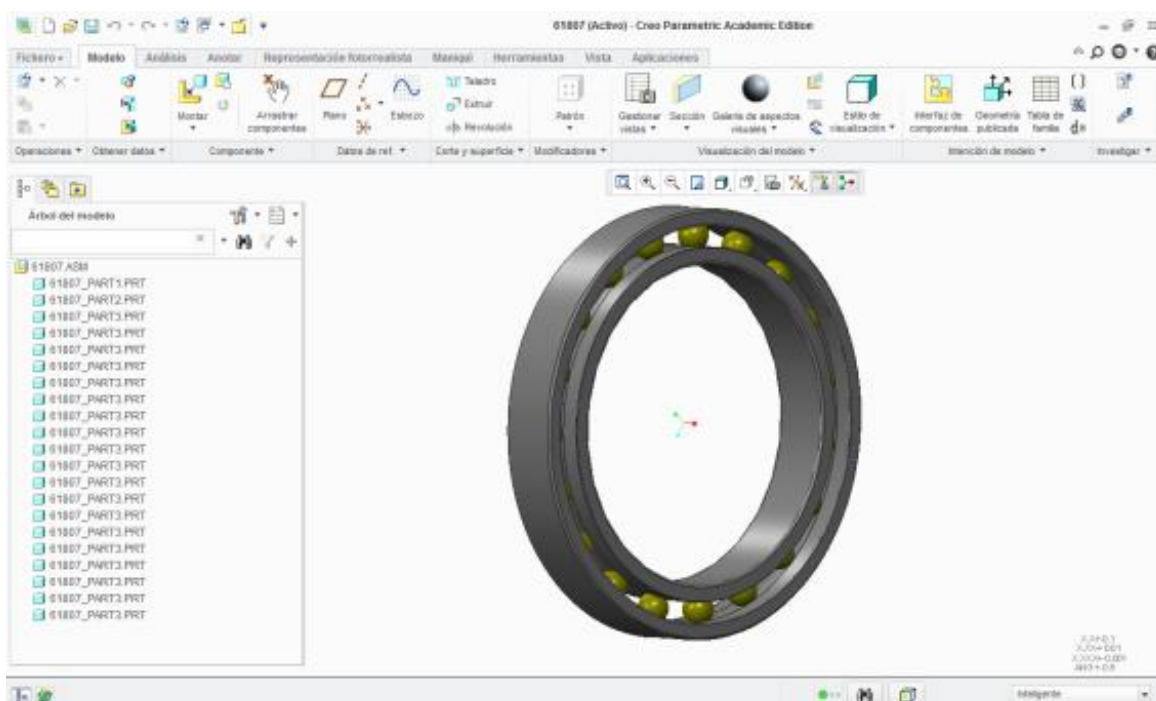
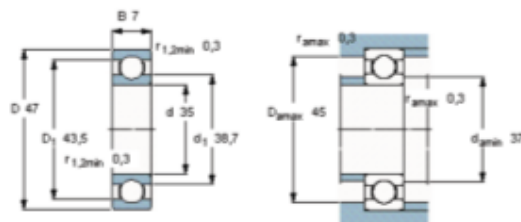


Figura 8.6: Rodamiento eje de entrada SKF 61807



Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera

Dimensiones principales			Capacidad de carga		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	dinámica C	estática C0	Velocidad de referencia	Limite de velocidad	
mm			kN		rpm		* rodamiento SKF Explorer
35	47	7	4,75	3,2	28000	18000	61807



Factores de cálculo
 k_1 0,015
 f_0 14

Figura 8.7: Características rodamiento SKF 61807.

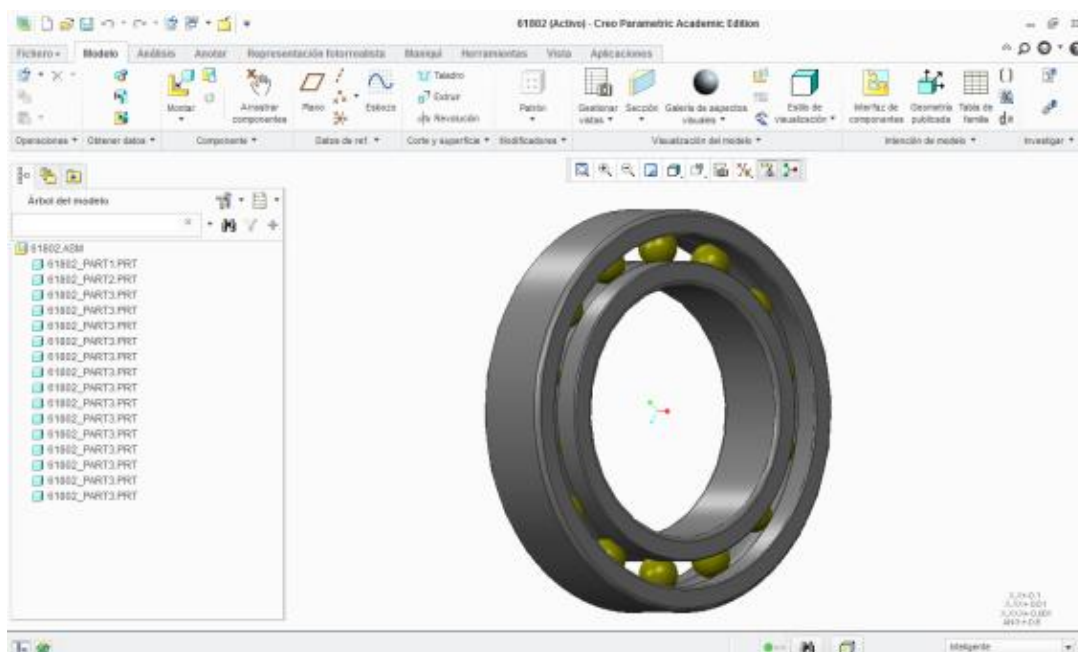
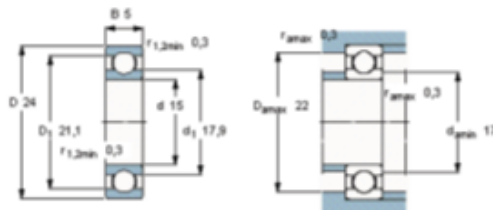


Figura 8.8: Rodamiento eje de entrada SKF 61802.



Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera

Dimensiones principales			Capacidad de carga		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	C	C0	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	
mm	24	5	kN		rpm		* rodamiento SKF Explorer
15			1,56	0,8	60000	38000	61802



Factores de cálculo
 k_f 0,015
 f_g 10

Figura 8.9: Características rodamiento SKF 61802.

Anillos de retención

Estos anillos elásticos son utilizados para mantener fijos a los rodamientos en su posición. Los anillos se encuentran alojados dentro de unas ranuras realizadas en los ejes de entrada salida.

Al igual que los rodamientos, se ha descargado el archivo CAD pero en este caso en otra página web [13] genérica de componentes. Los anillos elásticos tienen la referencia estandarizada DIN 471-d9 y DIN 471-d14 respectivamente. Las hojas de características con sus dimensiones es la siguiente:

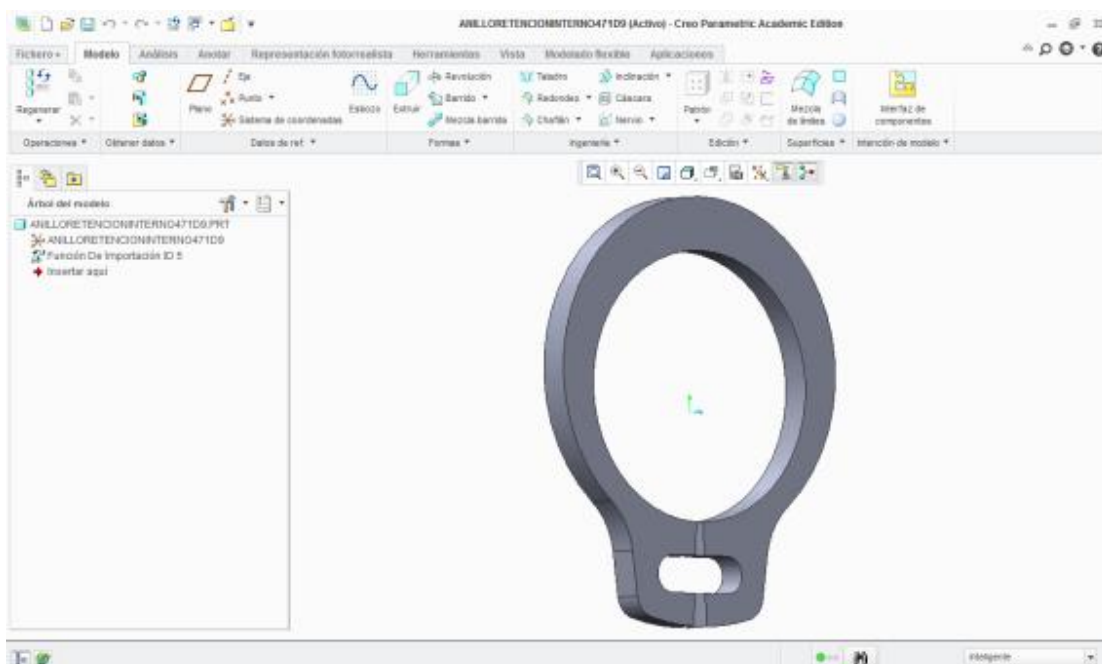
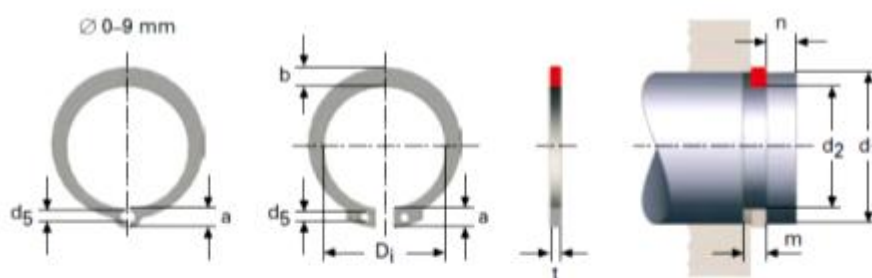


Figura 8.10: Anillo de retención DIN 471-d9.



All dimensions are in mm
Material: Spring steel CK 67
Finish: Phosphate and oiled

Shaft d_1	D_i	t h11	Ring dimension			Groove dimension			Cat. no.
			b	a Max.	d_5 Min.	d_2	d_2 Tol.	m Min.	
3	2,7	0,4	0,8	1,9	1	2,8	+0 / -0,04	0,5	7818
4	3,7	0,4	0,9	2,2	1	3,8	+0 / -0,04	0,5	7819
5	4,7	0,6	1,1	2,5	1	4,8	+0 / -0,04	0,7	7820
6	5,6	0,7	1,3	2,7	1,2	5,7	+0 / -0,06	0,8	7821
7	6,5	0,8	1,4	3,1	1,2	6,7	+0 / -0,06	0,9	7822
8	7,4	0,8	1,5	3,2	1,2	7,6	+0 / -0,06	0,9	7823
9	8,4	1	1,7	3,3	1,2	8,6	+0 / -0,06	1,1	7824
10	9,3	1	1,8	3,3	1,5	9,6	+0 / -0,11	1,1	7825
12	11	1	1,8	3,3	1,7	11,5	+0 / -0,11	1,1	7826
14	12,9	1	2,1	3,5	1,7	13,4	+0 / -0,11	1,1	7827
15	13,8	1	2,2	3,6	1,7	14,3	+0 / -0,11	1,1	7828
16	14,7	1	2,2	3,7	1,7	15,2	+0 / -0,11	1,1	7829

Figura 8.11: Características de retención DIN 471-d9.

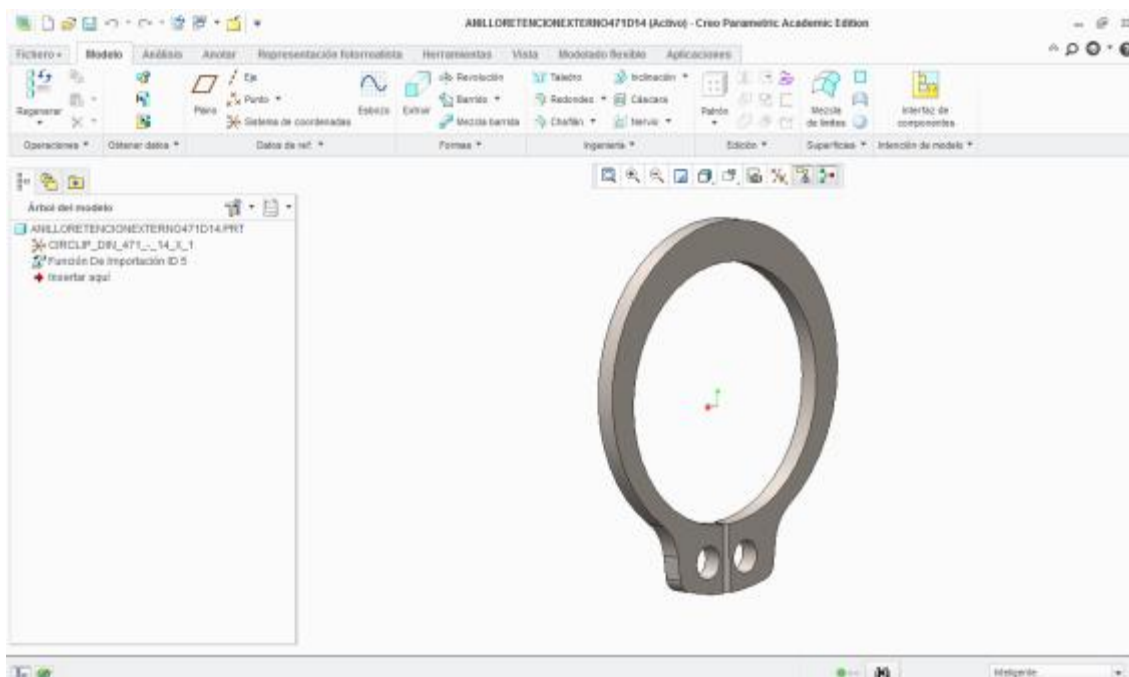
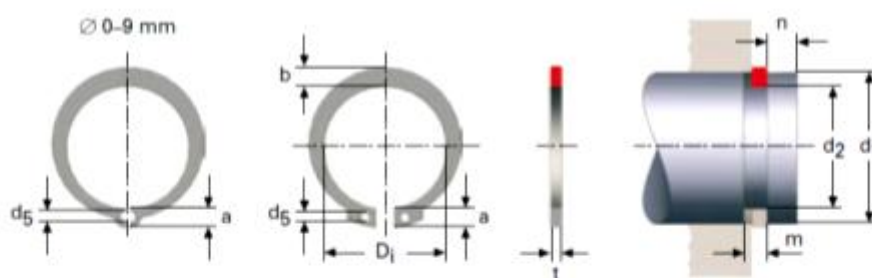


Figura 8.12: Anillo de retención DIN 471-d14.



All dimensions are in mm
 Material: Spring steel CK 67
 Finish: Phosphate and oiled

Shaft d_1	D_1	t h11	Ring dimension			d_2	Groove dimension		Cat. no.
			b	a Max.	d_5 Min.		d_2 Tol.	m Min.	
3	2,7	0,4	0,8	1,9	1	2,8	+0 / -0,04	0,5	7818
4	3,7	0,4	0,9	2,2	1	3,8	+0 / -0,04	0,5	7819
5	4,7	0,6	1,1	2,5	1	4,8	+0 / -0,04	0,7	7820
6	5,6	0,7	1,3	2,7	1,2	5,7	+0 / -0,06	0,8	7821
7	6,5	0,8	1,4	3,1	1,2	6,7	+0 / -0,06	0,9	7822
8	7,4	0,8	1,5	3,2	1,2	7,6	+0 / -0,06	0,9	7823
9	8,4	1	1,7	3,3	1,2	8,6	+0 / -0,06	1,1	7824
10	9,3	1	1,8	3,3	1,5	9,6	+0 / -0,11	1,1	7825
12	11	1	1,8	3,3	1,7	11,5	+0 / -0,11	1,1	7826
14	12,9	1	2,1	3,5	1,7	13,4	+0 / -0,11	1,1	7827
15	13,8	1	2,2	3,7	1,7	14,3	+0 / -0,11	1,1	7828
16	14,7	1	2,2	3,7	1,7	15,2	+0 / -0,11	1,1	7829

Figura 8.13: Características anillo de retención DIN 471-d14.

Ejes

Los ejes de entrada y salida del embrague magnetorreológico se encuentran realizado mediante extrusiones para obtener las diferentes formas cilíndricas con distintos diámetros y longitudes. Por otro lado, presenta diferentes chaflanes y ranurados en el propio eje donde albergará el anillo elástico anterior.

Todo los diámetros tienen una tolerancia de ± 0.25 mm. Para más detalles sobre la geometría, se adjuntan los archivos CAD

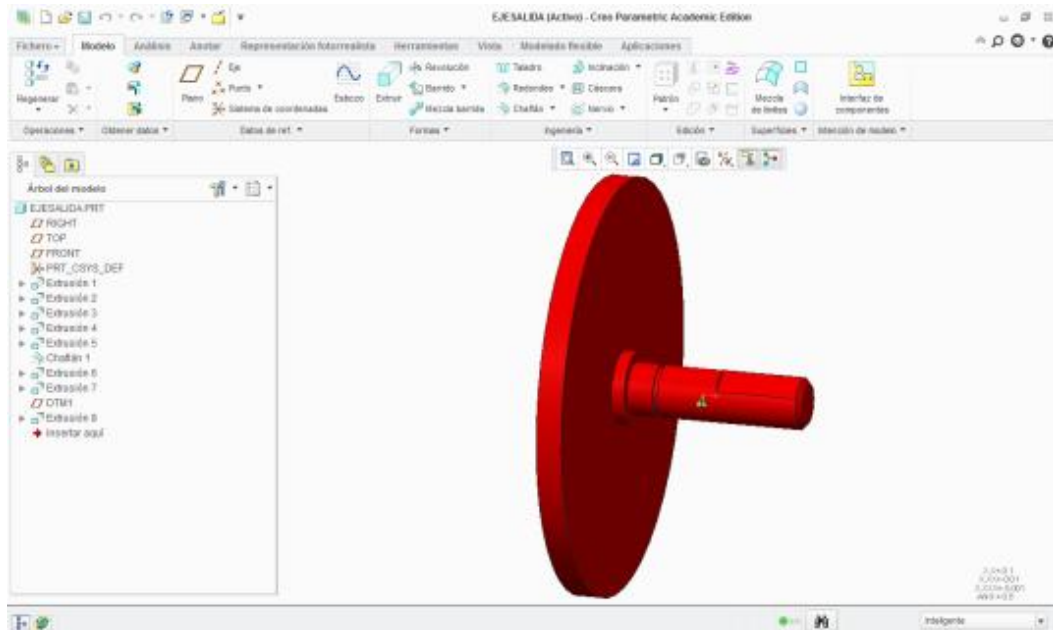


Figura 8.14: Eje de salida diseño original.

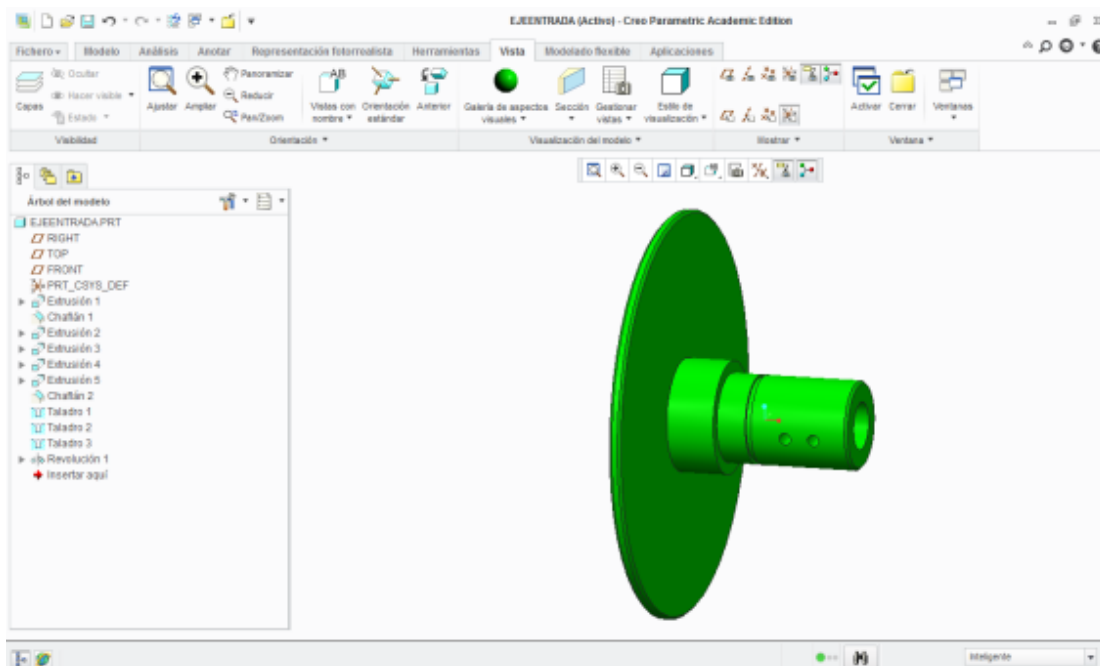


Figura 8.15: Eje de entrada diseño original.

Anillo de obturación en V

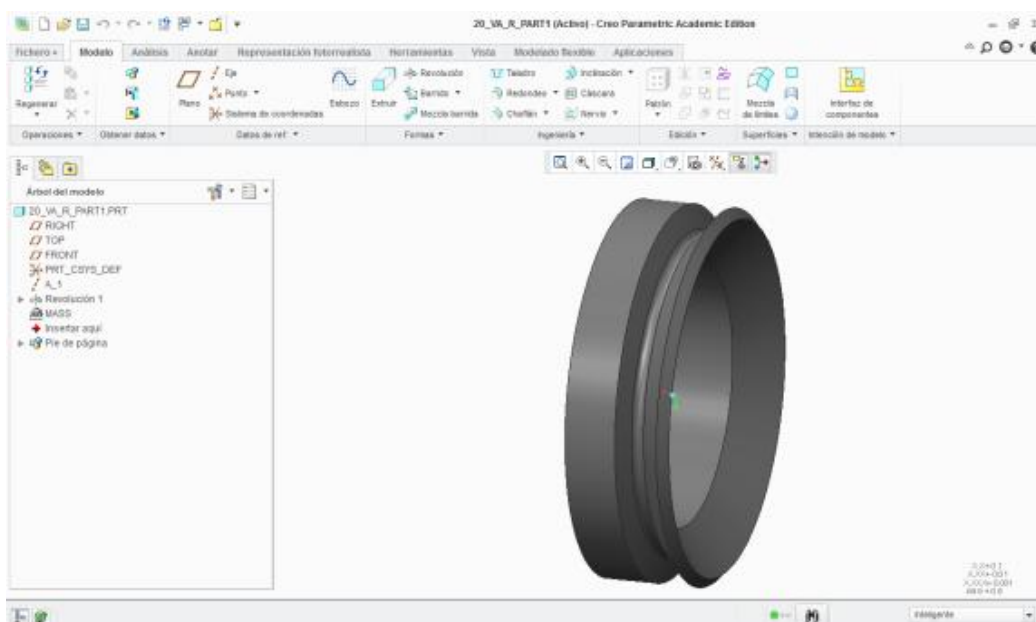


Figura 8.16: Anillo de obturación en V VR1/VA 20 VA R.

El archivo CAD de este anillo de obturación en V, ha sido descargado de la página web de SKF [12], con las dimensiones requeridas para el diseño. Se trata de un anillo de obturación en V modelo VR1/VA 20 VA R.

A continuación se adjunta hoja de características con las principales dimensiones del anillo de retención en cuestión:

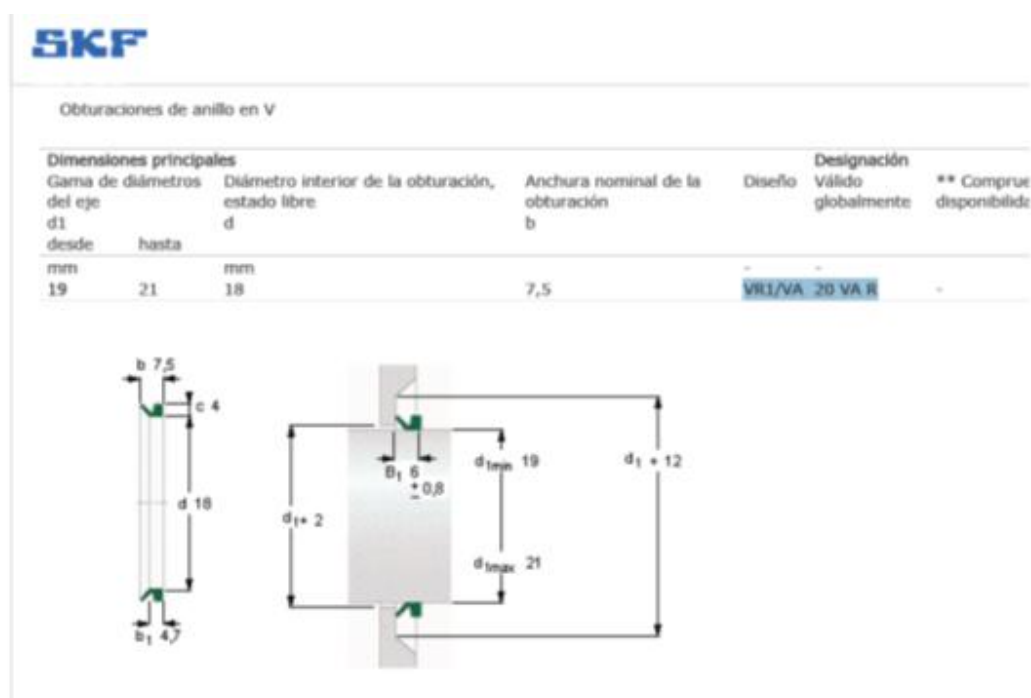


Figura 8.17: Características anillo de obturación en VR1/VA 20 VA R.

Tapa eje de salida

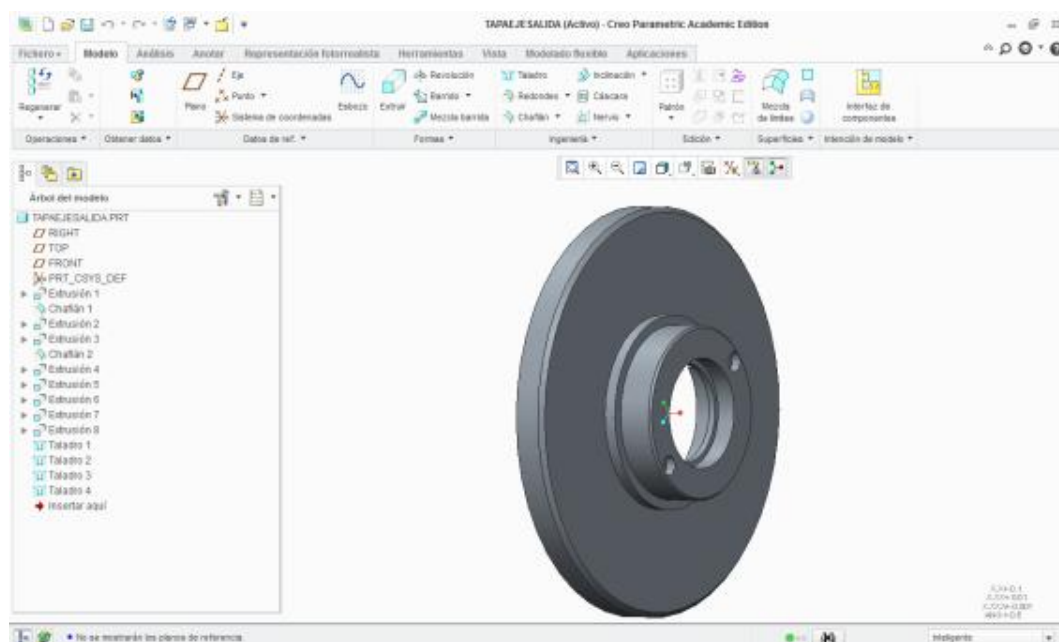


Figura 8.18: Tapa eje de salida diseño original.

La tapa del eje de salida del embrague magnetorreológico se encuentra realizado mediante extrusiones para obtener las diferentes formas cilíndricas con distintos diámetros y longitudes. Por otro lado, presenta diferentes taladros para acoplarlo con el motor ultrasónico.

Todo los diámetros tienen una tolerancia de ± 0.25 mm. Para más detalles sobre la geometría, se adjuntan los archivos CAD

8.2. Ensamblaje del conjunto

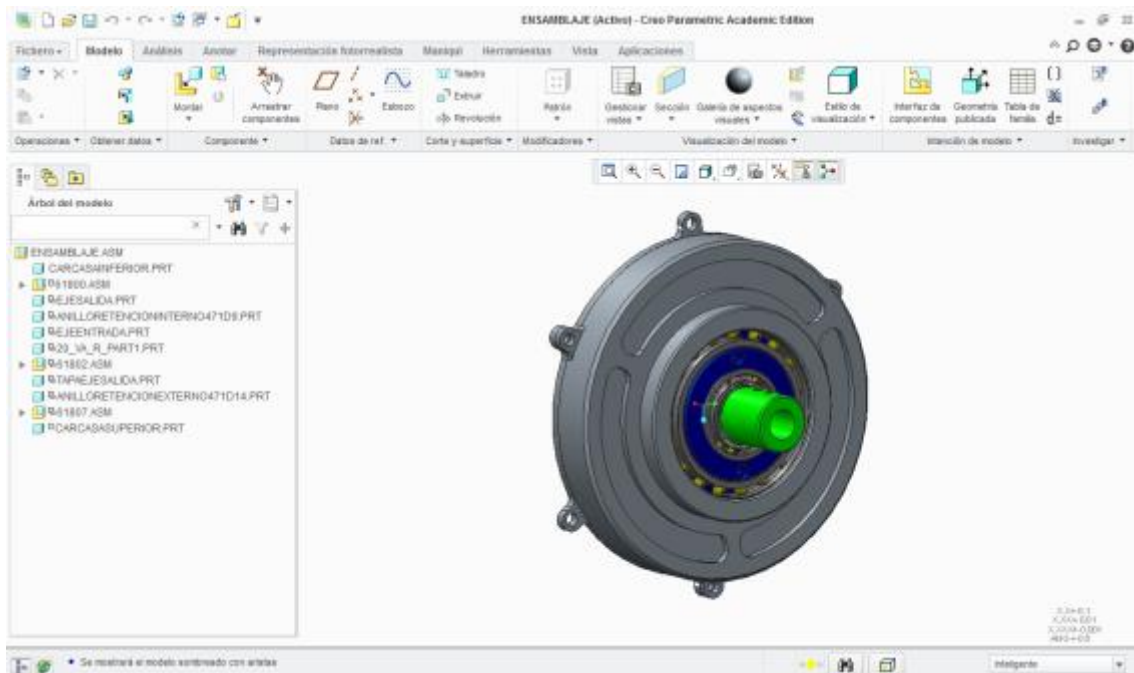


Figura 8.19: Ensamblaje original embrague magnetorreológico.

Para ensamblar todas las piezas descritas anteriormente y formar el embrague magnetorreológico, también utilizamos Creo Parametric 2.0 con la opción “montar” disponible en la barra de herramientas.

Una vez estemos introducidos en dicho menú, nos aparecerá la opción de elegir que pieza queremos montar y nos aparecerán una serie de restricciones con las cuales podremos ir contactando el conjunto de las piezas:

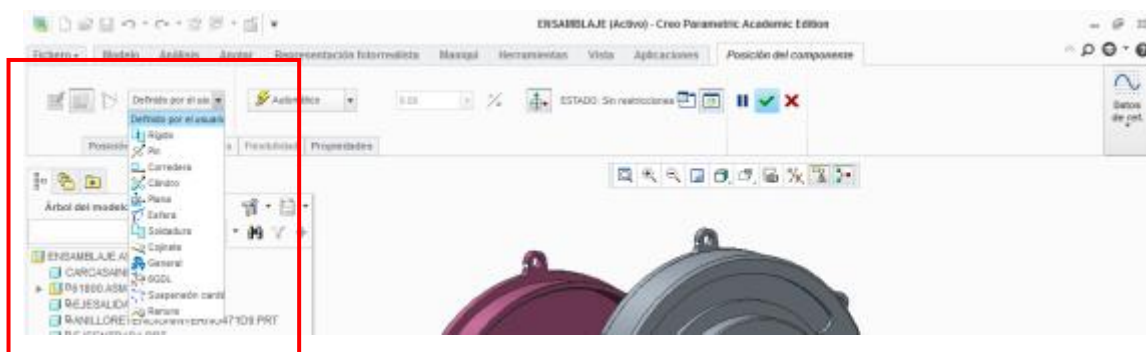


Figura 8.20: Restricciones entre piezas.

Con estas restricciones, se puede ir configurando los diferentes grados de libertad de las piezas y los movimientos relativos que podrán realizar unas respecto a otras. La pestaña que aparece a continuación, en la cual se encuentra seleccionada por defecto la opción “automático”, es utilizada para ubicar unas piezas respecto a las otras a una determinada distancia, colocarlas paralelas, perpendiculares, hacer que sus superficies sean tangentes, rígidas respecto al sistema de referencia, etc. Por regla general, se utilizara la opción automática salvo para las tapas exteriores del embrague que se mantendrán rígidas respecto al sistema de referencia global utilizado para ensamblar el embrague.

Con lo que respecta a los movimientos relativos de unas piezas respecto a las otras, se van a utilizar la opción rígido para las piezas que deben moverse como un conjunto, como por ejemplo es el caso de los ejes con los anillos de retención para los rodamientos y el anillo de obturación. Por otro lado, la opción “pin” ha sido utilizada para permitir el movimiento relativo de piezas coaxiales y que deben permitir movimiento relativo entre ellas, como es el caso de los rodamientos con los ejes y las tapas exteriores.

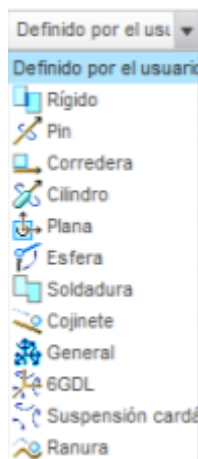


Figura 8.21: Movimientos relativos entre piezas.

Para obtener más detalles y observar los movimientos de las piezas con las restricciones mencionadas se adjunta el archivo CAD de todo el conjunto de las piezas ensamblado.

Capítulo 9

Problemas del modelo actual

9. Problemas del modelo actual

9.1. Problemas detectados

El diseño y fabricación del prototipo original de embrague magnetorreológico realizado por el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática presenta una serie de defectos que impiden que el funcionamiento del dispositivo sea el esperado para la aplicación en cuestión. Dichos problemas de diseño y fabricación, junto con sus correspondientes soluciones para solventarlos y conseguir un funcionamiento adecuado del embrague son el fundamento de este proyecto final de carrera.

Los principales problemas que presenta el diseño original del embrague magnetorreológico se clasifican procediendo después a una descripción más detallada de cada uno de ellos:

- Problemas de diseño en la geometría del embrague.
- Problemas de filtraciones y pérdidas de fluido magnetorreológico.
- Problemas de generación del campo magnético necesario.

Problemas de diseño en la geometría del embrague actual

La geometría de los componentes que forman el embrague magnetorreológico presenta una serie de problemas, los cuales se describen a continuación:

- Problemas con la carcasa exterior del embrague si la generación del campo magnético se realiza mediante bobinados: no hay suficiente espacio para albergarlos.
- El eje de entrada del embrague se encuentra mal dimensionado originalmente. La pieza original se encuentra diseñada y fabricada con un diámetro interior del eje de entrada de 10 mm, mientras que los requerimientos con los que fue ideado originalmente indicaban un diámetro de 8 mm.
- El diseño del embrague puede resultar mecánicamente complejo, lo cual supone mayores dificultades a la hora de proceder a su fabricación y mayores costes.

Problemas de filtraciones y pérdidas de fluido magnetorreológico

Los inconvenientes relacionados con este problema de filtración y pérdidas del fluido magnetorreológico son los siguientes:

- Pérdidas de fluido magnetorreológico tanto por el eje de entrada como por el eje de salida debido a un fallo de diseño en los elementos de estanqueidad.
- Intrusión de fluido magnetorreológico con sus correspondientes micro partículas coloidales magnéticas en los rodamientos, especialmente los ubicados en el eje de entrada. Este inconveniente origina un bloqueo de las bolas que componen dicho rodamiento, dificultando o incluso impidiendo su correspondiente giro.

Problemas de generación de campo magnético requerido

El problema principal que presenta este primer diseño es la generación del campo magnético necesario para poder modificar las propiedades reológicas del fluido. En el actual diseño no se consigue crear un campo electromagnético suficiente para magnetizar el fluido y transmitir el par del eje de entrada al eje de salida sin calentar de forma excesiva el dispositivo y manteniendo el consumo eléctrico dentro de unos niveles aceptables, teniendo en cuenta que se trata de un dispositivo portátil. Se necesita el cálculo y rediseño para mejorar el actual sistema de generación de campo magnético para conseguir los resultados deseados. En el capítulo 11 de esta memoria se estudiarán en profundidad distintas soluciones al problema.

Capítulo 10

Modificaciones en la geometría del embrague

10. Introducción

En este capítulo se van a proponer soluciones a los problemas de la geometría del embrague y los problemas de pérdidas y filtraciones de fluido magnetorreológico.

Ambos problemas se van a resolver de forma conjunta, ya que haciendo pequeñas modificaciones en las piezas del embrague vamos a conseguir eliminar los problemas que, a priori, presenta el embrague debido a fallos geométricos.

Además de esto, se van a seguir las premisas dictadas por los responsables del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, las cuales exigen un diseño simple, funcional y lo más económico posible. De esta manera, se simplificará todo lo posible la forma y geometría del dispositivo para facilitar su fabricación y se sustituirán las piezas que no garantizan la estanqueidad del fluido por otras que si lo hagan.

Todas estas modificaciones serán implementadas en el modelo virtual con el programa de CAD PTC Creo 2.0.

10.1. Modificación del eje de entrada.

El eje de entrada actual del embrague magnetorreológico está realizado con hierro y originalmente con un eje de diámetro interior de 10 mm cuando los requerimientos iniciales de diseño exigían 8 mm.

Una vez modelada la figura original en PTC Creo Parametric 2.0 tiene una solución sencilla, la cual se muestra en la siguiente figura:

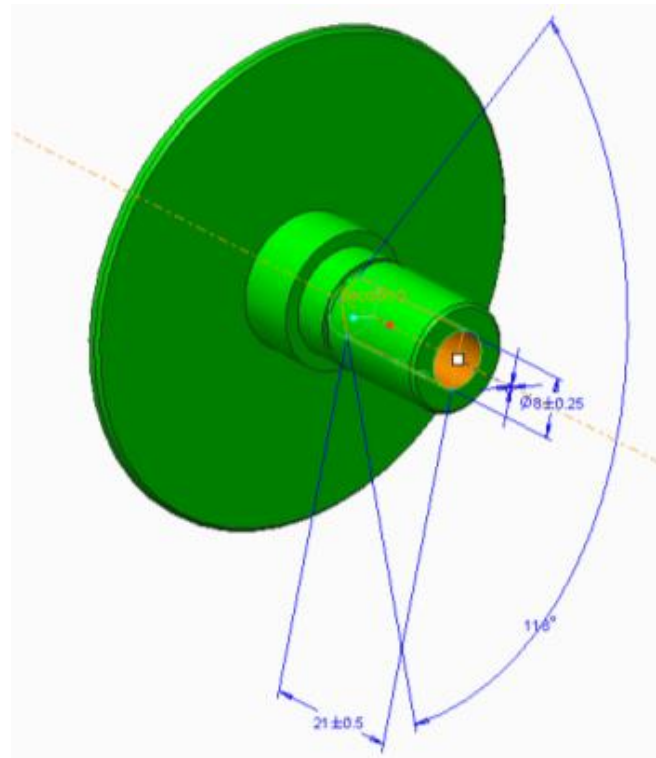


Figura 10.1: Modificación eje de entrada.

Además de modificar la dimensión del diámetro interior del eje, se ha procedido a mantener el material con el cual está realizada la pieza, no sustituyendo el hierro por el material que están realizadas el resto de piezas del embrague, aluminio. Se ha decido mantener este material por motivos relacionados con la generación del campo magnético que en el capítulo siguiente se procederá a explicar con mayor profundidad.

10.2. Modificación anillo de obturación en V.

Los inconvenientes del anillo de obturación en V seleccionado originalmente y situado en la base del eje de entrada, son la filtración y las pérdidas del fluido magnetorreológico. Los problemas que ocasiona el incorrecto funcionamiento de este componente son los siguientes:

En la siguiente imagen se muestra el anillo obturador situado en la base del eje de entrada y buscando la estanqueidad entre dicho eje y la tapa del eje de salida.

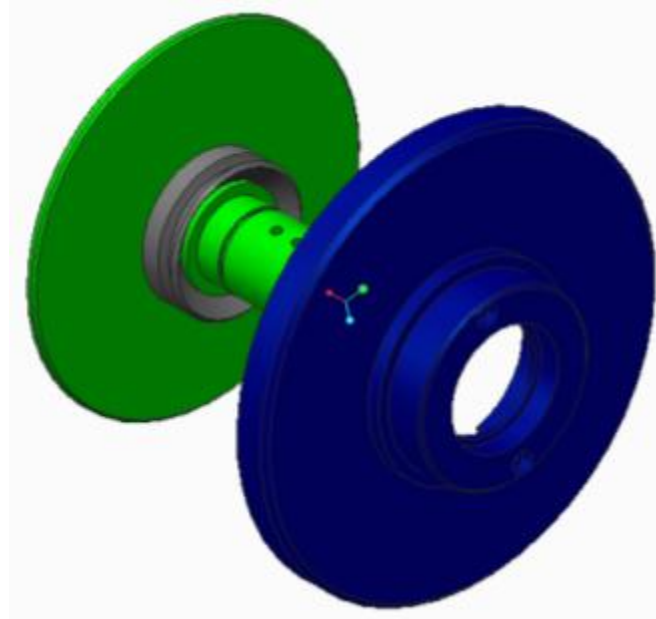


Figura 10.2: Ubicación anillo obturador en V.

Para solucionar este problema, se ha pensado en sustituir el anillo obturador simple del fabricante SKF por un nuevo sello radial con resorte en el labio de contacto. Este nuevo componente ha sido seleccionado del catálogo del mismo fabricante SKF, presentando las características descritas en el siguiente apartado.

10.2.1. Sellos HMS5 y HMSA10.

Características principales

Los sellos radiales de eje métricos HMS5 y HMSA10 SKF [9], que cuentan con un diámetro exterior de caucho, están diseñados de acuerdo con las normas ISO 6194-1 y DIN 3760 para el uso en una amplia variedad de aplicaciones industriales. La gama de tamaños disponibles de los sellos HMS5 y HMSA10 abarca todas las dimensiones según las normas ISO 6194-1 y DIN 3760 para diámetros de eje de hasta 250 mm (9,842 in), así como una amplia gama de dimensiones normalmente utilizadas en el mercado. Se añaden continuamente nuevas dimensiones.



Figura 10.3: Sello radial HMS5.



Figura 10.4: Sello radial HMSA10.

Entre sus principales características, se incluyen las siguientes:

- El material del labio de sello es optimizado.
- El labio de sello está cargado mediante muelle.
- El labio de sello y la sección flexible están equilibrados óptimamente.
- El diámetro exterior es estriado.
- El sello cuenta con un labio auxiliar (únicamente en el caso de los sellos HMSA10).



Figura 10.5: Sello radial con resorte en el labio de SKF.

Diseño

El diámetro exterior de caucho ofrece una capacidad de sellado optimizada en el soporte, en superficies de rugosidad considerable o en soportes partidos. Las estrías en el diámetro exterior ofrecen una mejor capacidad de sellado y retención en el agujero. También evitan que el sello se salga de su sitio durante la instalación.

El labio del sello cargado mediante muelle contribuye a conseguir una rápida respuesta para adaptarse a la variación dinámica y mantener la eficacia de sellado, incluso cuando el desgaste del labio es excesivo.

El labio del sello y la sección flexible están equilibrados óptimamente, con el fin de soportar tanto la alta variación dinámica como la desalineación entre el eje y el agujero.

El labio auxiliar de los sellos HMSA10 es no rozante, lo que significa que los sellos, normalmente, pueden funcionar a las mismas velocidades que los sellos HMS5 con un solo labio.

El compuesto optimizado de caucho de nitrilo utilizado para los sellos HMS5 y HMSA10 tiene el sufijo de designación RG. Entre las ventajas de este material, se incluyen las siguientes:

- Buena resistencia contra el envejecimiento;
- Muy buena capacidad de bombeo;
- Buena resistencia contra el desgaste.

Los sellos HMS5 y HMSA10 están diseñados para aplicaciones lubricadas con aceite o grasa a temperaturas de funcionamiento de entre -40 y 100 °C, y hasta 120 °C durante breves periodos. Estos sellos también son apropiados para usar con lubricantes de sellado dentro de una amplia gama de viscosidades.

10.2.2. Selección.

Para seleccionar el anillo de obturación más adecuado para el embrague magnetorreológico, se han tenido en cuenta las necesidades de estanqueidad requeridas en el diseño y se ha elegido el sello radial con resorte HMS5 V 19x30x7 de SKF. Ha sido elegido este modelo en lugar del anillo HMSA10 porque se ha considerado que no es necesario emplear el labio auxiliar interior.

Las características que presenta el nuevo obturador radial son las siguientes:

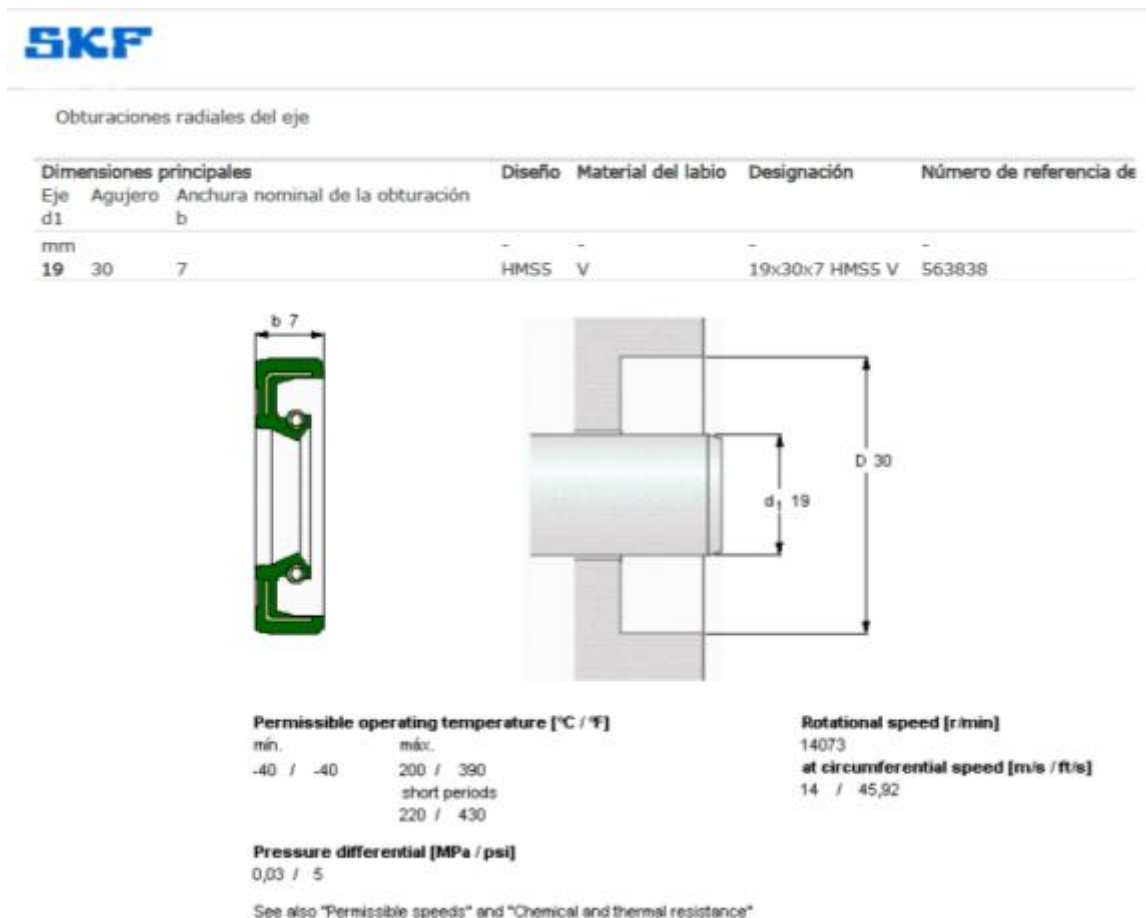


Figura 10.6: Características sello radial con resorte HMS5.

No obstante, debido a la inexistencia de sellos radiales con resorte de las mismas medidas que el original sin resorte, ha sido necesario escoger el más próximo en dimensiones y realizar modificaciones sobre otros componentes del embrague. Los componentes que ven afectadas sus dimensiones para poder albergar el sello radial son los siguientes:

- Carcasa eje de salida
- Rodamiento 61802
- Rodamiento 61807
- Carcasa superior

El resto de componentes que forman el embrague permanecerán invariables, salvo el citado eje de entrada con el cambio de material y dimensiones del diámetro interior del eje comentado en el apartado anterior.

El cambio de dimensiones en el anillo obturador queda reflejado en las siguientes tablas:

Obturador Original
d1: 19 mm
b: 7.5 mm
d_{ext}: 27 mm
d_{agujero necesario}: 28 mm
b_{agujero}: 6 mm

Nuevo Obturador
d1: 19 mm
b: 7 mm
D_{ext}: 29 mm
D_{agujero necesario}: 30 mm
b_{agujero}: 6 mm

Tabla 10.1: Dimensiones obturador original.

Tabla 10.2: Dimensiones nuevo obturador.

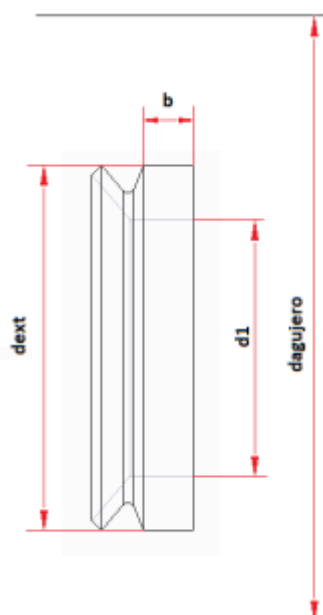


Figura 10.7: Croquis anillo de obturación en V.

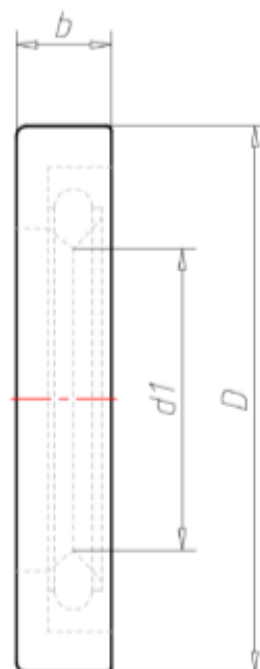


Figura 10.8: Croquis sello radial con resorte.

Como se puede comprobar, las dimensiones de los anillos y el diámetro de los agujeros necesarios para albergarlos y que desempeñen su función correctamente no coincide. Por lo tanto, es necesario realizar las modificaciones en las diferentes partes mencionadas para poder colocar este componente que solucionara parte de los problemas de estanqueidad del embrague.

10.3. Modificación tapa eje de salida

Como se ha comentado en el capítulo anterior, para poder colocar en el eje de entrada el nuevo sello radial con resorte en el labio es necesario realizar modificaciones en este componente para poder albergarlo.

Estas modificaciones consisten, de manera fundamental, en incrementar 2 mm el diámetro interior donde se encuentra alojado el sello. Sin embargo, esto provoca como consecuencia el rediseño de otras partes de esta pieza. La modificación se puede observar en la siguiente imagen de la pieza en cuestión:

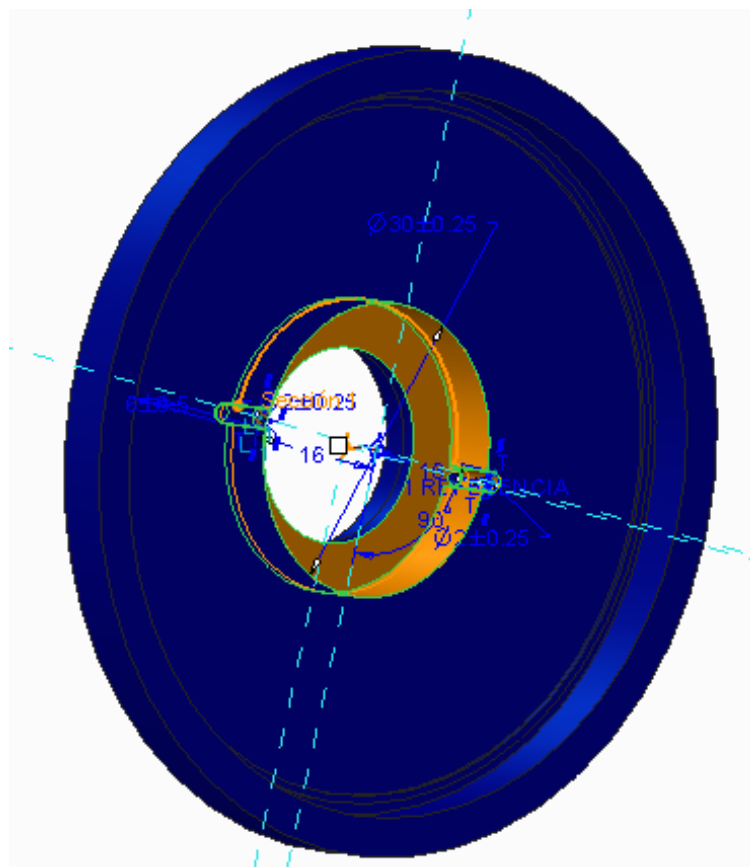


Figura 10.9: Modificaciones tapa eje de salida.

Como muestra la figura anterior, las dimensiones de la cavidad interior de la tapa donde va alojado el sello se modifican, pasando de 28 mm a 30 mm de diámetro.

En consecuencia, los taladros pasantes se ven desplazados también 1 mm a lo largo del diámetro donde se encuentran ubicados, como se muestra en la siguiente imagen:

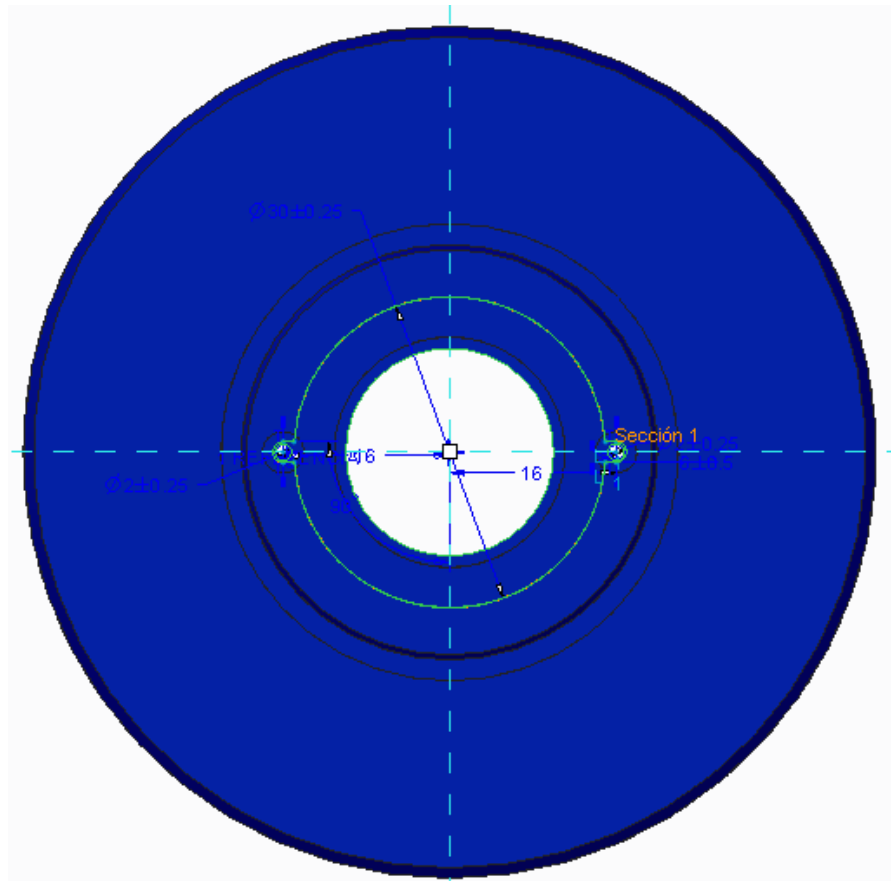


Figura 10.10: Vista frontal ampliada tapa eje de salida.

Además de esto, ha sido necesario ampliar el eje donde va incorporado el rodamiento 61807 debido a que el orificio que alberga la cabeza del tornillo para acoplar el embrague al motor pierde su forma circular. Debido a esto, el eje pasa de 35 mm a 40 mm de diámetro, y por lo tanto, el rodamiento 61807 debe de ser sustituido por otro con un diámetro interior mayor.

Este cambio de geometría de la carcasa del eje de salida está representado en las siguientes capturas de pantalla:

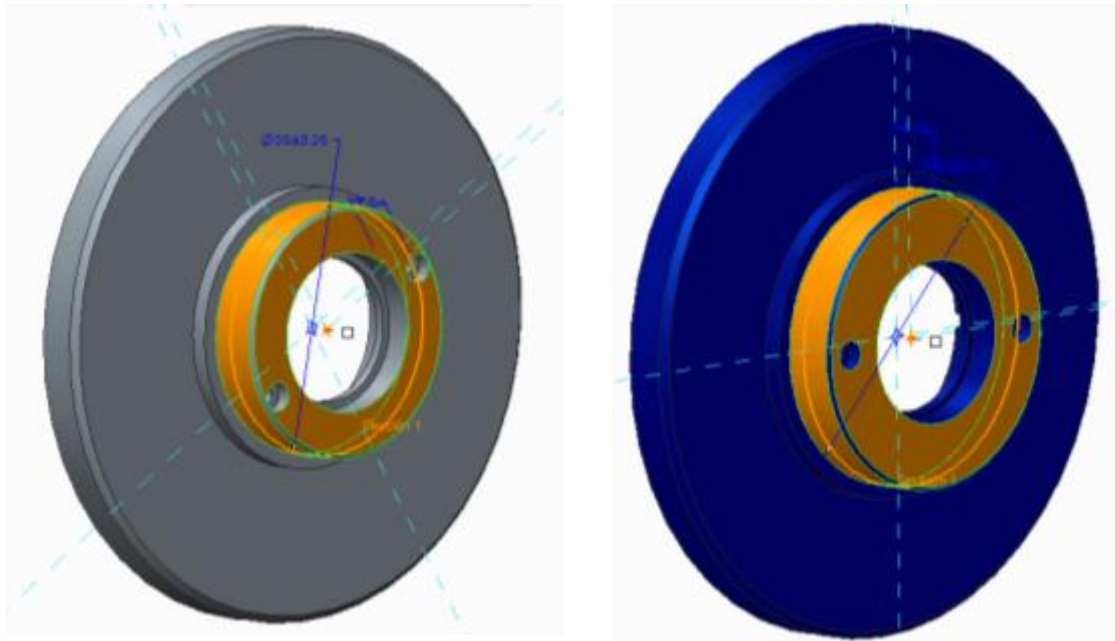


Figura 10.11: Modificaciones para alojar rodamiento 61808.

Por otra parte, por lo que respecta al rodamiento 61802, no es necesario aplicarle ninguna modificación geométrica pero si constructiva, es decir, es necesario seleccionar otra modelo de rodamiento para complementar la solución de sellado que proporciona el nuevo obturador.

Los nuevos rodamientos seleccionados cuentan con protecciones especiales para evitar la entrada de partículas en sus bandas de rodadura.

En el siguiente apartado se entrará más en detalles acerca del nuevo rodamiento, sus características y dimensiones.

Para más información acerca de la nueva geometría de la tapa del eje de salida, consultar los planos presentes en el Anexo 4.

10.4. Modificación rodamientos 61800,61802 y 61807.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, los rodamientos que forman parte del embrague magnetorreológico y que permiten el giro relativo entra las diferentes partes de este van a sufrir modificaciones. Los cambios que necesarios para la mejora del diseño del embrague son los siguientes:

- Rodamiento 61802, el cual permite el giro relativo entre el eje de entrada y la carcasa de la tapa del eje de salida, va a ser sustituido por otro modelo de rodamiento con protecciones pero conservando las dimensiones originales.

- Rodamiento 61800, el cual permite el giro relativo entre el eje de salida y la carcasa superior del embrague, va a ser sustituido por otro modelo de rodamiento con protecciones pero conservando las dimensiones originales.
- El rodamiento 61807, el cual permite el giro relativo entra la tapa del eje de salida y la carcasa superior del embrague, va a sufrir modificaciones geométricas como se ha mencionado anteriormente pero se conservará el modelo elegido originalmente.

Los rodamientos 61802 y 61807 a modificar se representan en la siguiente imagen:

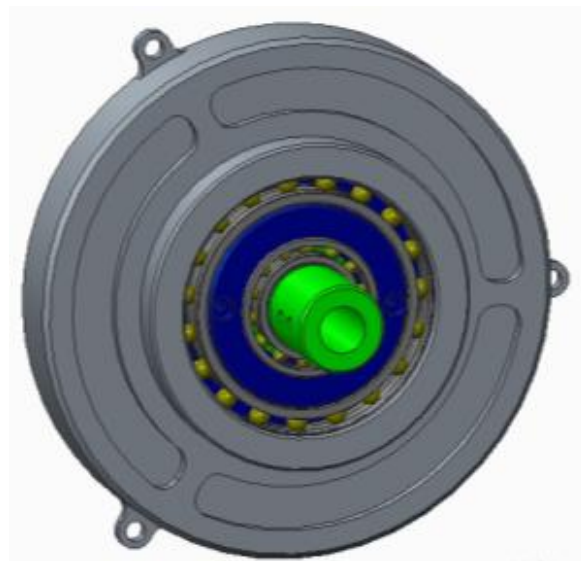


Figura 10.12: Ubicación rodamientos 61802 y 61807 a sustituir.

El rodamiento 61800 a modificar se representa en la siguiente imagen:

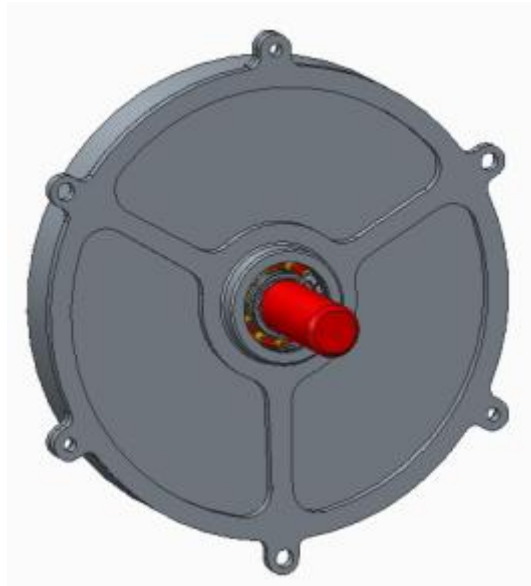


Figura 10.13: Ubicación rodamiento 61800 a sustituir.

Como se puede observar, los rodamientos 61800 y 61802 montados en el diseño original, no presentan ningún tipo de protección para evitar la entrada de partículas en las bandas de rodadura de las bolas. Por este motivo, cuando se producen fugas de fluido magnetorreológico se producen bloqueos a consecuencia de la presencia de micropartículas magnéticas entre las bolas.

Las características que presentan los rodamientos de bolas originales del fabricante SKF se encuentran descritas en el capítulo 8 de esta memoria.

10.4.1. Selección de nuevos modelos de rodamientos.

Para seleccionar los nuevos modelos de rodamientos que proporcionen las soluciones de sellado requeridas para este problema de filtraciones, se ha recurrido al catalogo comercial de SKF [10].

SKF suministra los tamaños más populares de rodamientos rígidos de una hilera de bolas con sellos integrales o placas de protección en uno o ambos lados de la banda de rodadura.

Los rodamientos sellados a ambos lados están lubricados de por vida y no deben lavarse ni ser lubricados de nuevo. Los rodamientos se llenan con la cantidad apropiada de grasa de alta calidad en condiciones de alta limpieza, considerándose prácticamente libres de mantenimiento.

SKF no recomienda exponer este tipo de rodamientos con protecciones laterales a temperaturas por encima de 80°C. Si las temperaturas son relativamente elevadas, se debe asegurar que la temperatura no exceda de la temperatura admisible de la junta o grasa lubricante, lo que sea más restrictivo en cualquier caso.

Las posibles soluciones disponibles para este sellado son las siguientes:

- Placas de protección.
- Sellos no rozantes.
- Sellos de baja fricción.

10.4.1.1. Rodamientos con placas de protección.

El nuevo modelo seleccionado de rodamiento para el embrago es el rodamiento con placa de protección [11]. Para la aplicación en cuestión y con la incorporación del sello radial con resorte en el labio es una solución suficiente para satisfacer los requerimientos de sellado.



Figura 10.14: Rodamientos con placas de protección.

Los rodamientos con placas de protección laterales están destinados principalmente para aplicaciones donde el anillo interior gira. Las placas de protección están equipadas en el anillo exterior y no hacen contacto con el anillo interior, sino que forman un hueco estrecho con él. Las placas se encuentran fabricadas de chapa de acero.

Dependiendo del rodamiento de diseño, la serie y el tamaño, SKF suministra placas de en diferentes diseños. Los rodamientos equipados con placas de protección se encuentran designadas por el sufijo Z.

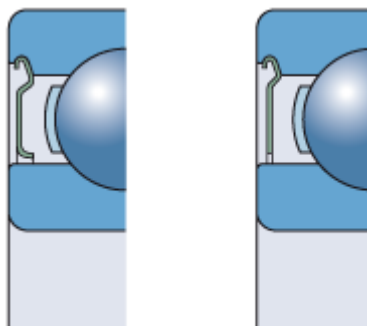


Figura 10.15: Placas de protección.

Los rodamientos que se han seleccionado para ir ubicados en la tapa del eje de salida son los siguientes y presentan las siguientes características:

Rodamiento SKF 61802-2Z:

Este rodamiento sustituye al antiguo 61802 y presenta las mismas dimensiones que su antecesor, con la salvedad de incorporar las placas de protección:



Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	dinámica C	estática C0	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	* rodamiento SKF
mm			kN		rpm		
15	24	5	1,56	0,8	60000	30000	61802-2Z

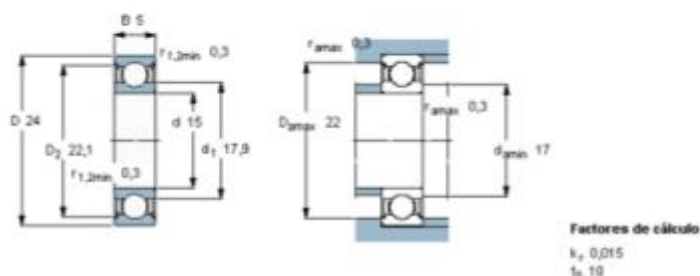


Figura 10.16: Características rodamiento SKF 61802-2Z.

Rodamiento SKF 61808:

Este rodamiento sustituye al antiguo 61807 y presenta modificaciones en sus dimensiones. No se ha considerado necesario incorporar placas de protección debido a que por su ubicación no va a entrar en contacto con el fluido magnetorreológico en ningún momento aunque existiesen fugas. Por este motivo, y por ahorrar costes de piezas en el embrague, se ha considerado mantener el mismo modelo de rodamiento.

Las características principales del nuevo rodamiento 61808 aparecen en la siguiente tabla:



Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	dinámica C	estática C0	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	* rodamiento SKF
mm			kN		rpm		
40	52	7	4,94	3,45	26000	16000	61808

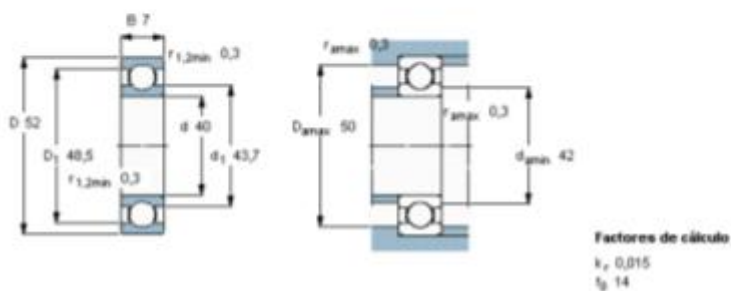


Figura 10.17: Características rodamiento SKF 61808.

Las dimensiones principales de ambos rodamientos son las que aparecen en la siguiente tabla comparativa:

Rodamiento 61807	Rodamiento 61808
B : 7 mm	B : 7 mm
d: 35 mm	d: 40 mm
D: 47 mm	D: 52 mm

Tabla 10.3: Comparativa de dimensiones rodamientos 61807 y 61808.

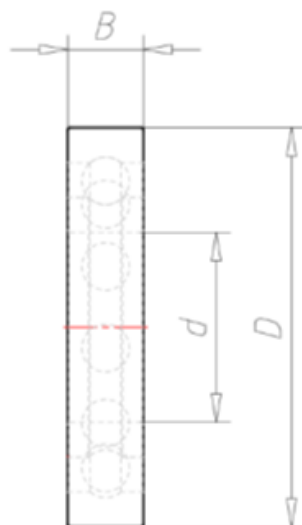


Figura 10.18: Croquis dimensiones rodamiento 61808.

Como se puede observar comparando las dimensiones de ambos rodamientos, y se ha comentado anteriormente, es necesaria la modificación de la tapa del eje de salida en el eje donde va ubicado este rodamiento, aumentando esta de 35 mm orinales hasta los 40 mm necesarios para alojar el nuevo rodamiento como se comento en el apartado anterior.

Del mismo modo, hay que adecuar la carcasa superior que protege el eje de entrada. Para albergar el nuevo rodamiento es necesario ampliar el agujero del eje de 47 mm hasta los 52 mm que tiene el diámetro exterior del rodamiento. Se entrará más en detalle en el siguiente apartado cuando se hable acerca de las modificaciones que presentará esta carcasa.

Rodamiento SKF 61800-2Z:

Este rodamiento sustituye al antiguo 61800 que permite el giro relativo entre el eje de salida y la carcasa superior. Este nuevo rodamiento presenta las mismas dimensiones que su antecesor, con la salvedad de incorporar las placas de protección:



Rodamientos rígidos de bolas, de una hilera

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	dinámica C	estática C0	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	* rodamiento SKF
mm			kN		rpm		
10	19	5	1,38	0,585	80000	38000	61800-2Z

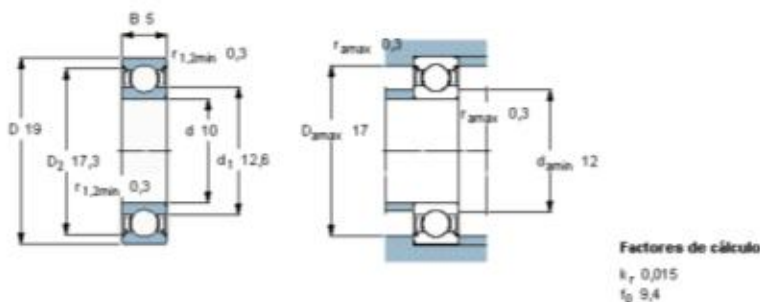


Figura 10.19: Características rodamiento SKF 61800-2Z.

10.5. Modificación carcasa superior.

Este pieza que compone la parte exterior del embrague magnetorreológico junto con la carcasa inferior, ha sufrido una serie de modificaciones respecto a su diseño original.

Los motivos por los cuales se han realizado estas modificaciones son los siguientes:

- El primero de ellos, y como se ha mencionado en el apartado anterior, se debe a modificaciones ocasionadas por la selección del nuevo rodamiento 61808. Esto provoca que sea necesario ampliar el diámetro del orificio donde va acoplado dicho rodamiento de 47 mm a 52 mm. Además de esto, se adaptara la geometría interna de la carcasa para garantizar que todas las piezas encajen.
- Por otra parte, y con el fin de simplificar el diseño del embrague, se ha considerado oportuno eliminar las ramificaciones que presenta la superficie de esta carcasa superior, entendiéndose que no aportan ningún tipo de cometido estructural ni funcional. De esta manera, se simplifica de manera considerable el proceso de fabricación y en consecuencia, el coste unitario de fabricar dicha pieza.

En las siguientes capturas de pantalla de PTC Creo Parametric 2.0, se representa la pieza original y las modificaciones explicadas en el párrafo anterior:



Figura 10.20: Carcasa superior original.

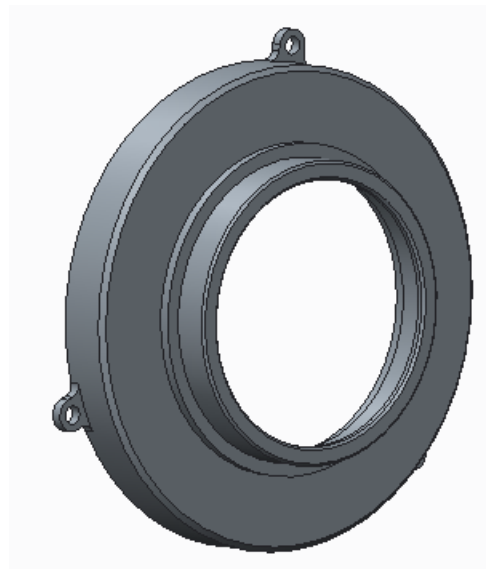


Figura 10.21: Carcasa superior modificada.

Para obtener más información de la geometría consultar los planos en el **Anexo 4**.

10.6. Modificaciones carcasa inferior.

La carcasa inferior del embrague magnetorreológico, al igual que se ha realizado con la carcasa superior, se ha considerado oportuno modificarla con el fin de simplificar el diseño del embrague.

De esta manera, se ha procedido a eliminar las ramificaciones que presenta la superficie de esta carcasa inferior, entendiéndose que no aportan ningún tipo de cometido estructural ni funcional. De esta manera, se simplifica de manera considerable el proceso de fabricación y en consecuencia, el coste unitario de fabricar dicha pieza.

En las siguientes capturas de pantalla de PTC Creo Parametric 2.0, se representa la pieza original y las modificaciones explicadas en el párrafo anterior:



Figura 10.22: Carcasa inferior original.

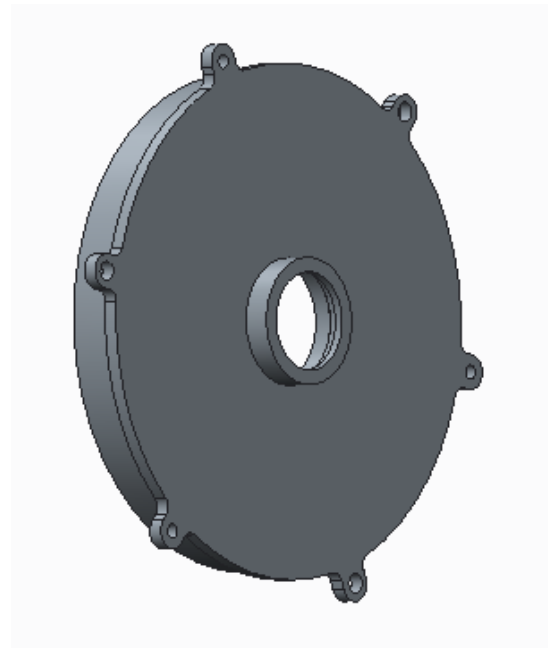


Figura 10.23: Carcasa inferior modificada.

Para obtener más información de la geometría consultar los planos en Anexo 4.

10.7. Geometría final del modelo.

En este último apartado se mostrará cual va a ser el aspecto final que presentara el embrague magnetorreológico en su conjunto con las mejoras en las piezas que se han seleccionado.

Cabe resaltar, que el material con el cual van a ser fabricadas las piezas va a ser aluminio en su totalidad, sustituyendo el hierro como material constitutivo del eje de entrada debido a problemas que ocasiona en la generación del campo magnético necesario.

En el siguiente capítulo se entrará más en detalle en este asunto y se justificará el porqué del cambio de material.

El aspecto final que presentará el embrague magnetorreológico con todos los nuevos componentes seleccionados y las modificaciones de las piezas que se han conservado es el siguiente:

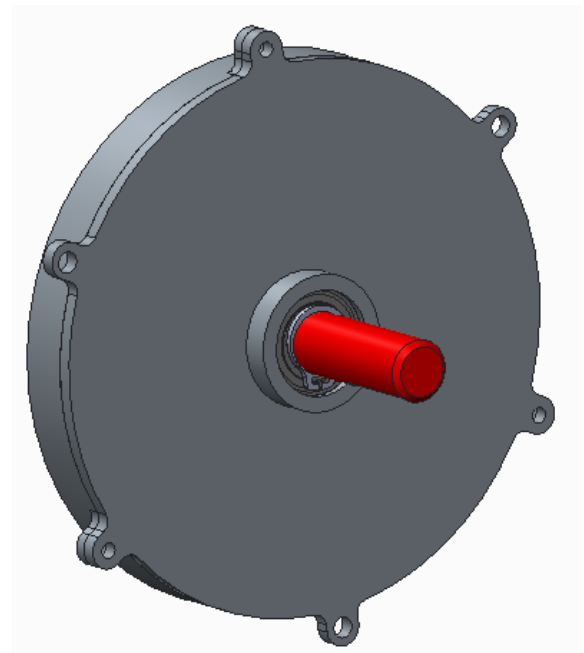
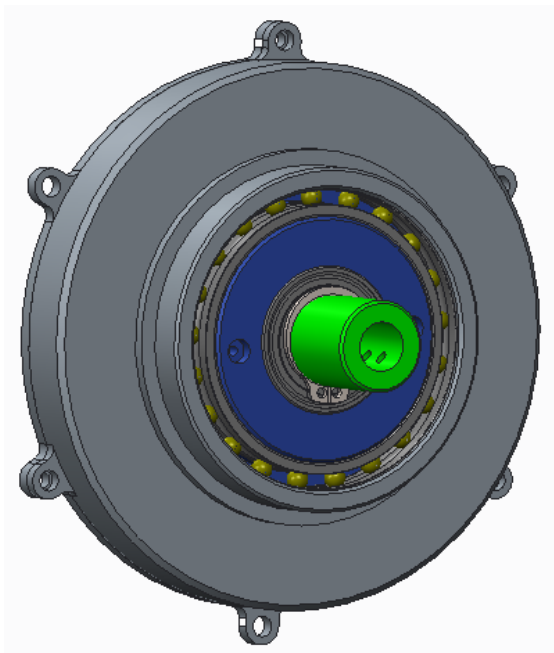


Figura 10.24: Vista eje de entrada embrague modificado. Figura 10.25. : Vista eje de salida embrague modificado.

En el **anexo 4** se encuentran los planos detallados de todas las piezas modificadas.

Una imagen de la sección del embrague magnetorreológico muestra como se encuentran ensambladas las nuevas piezas:

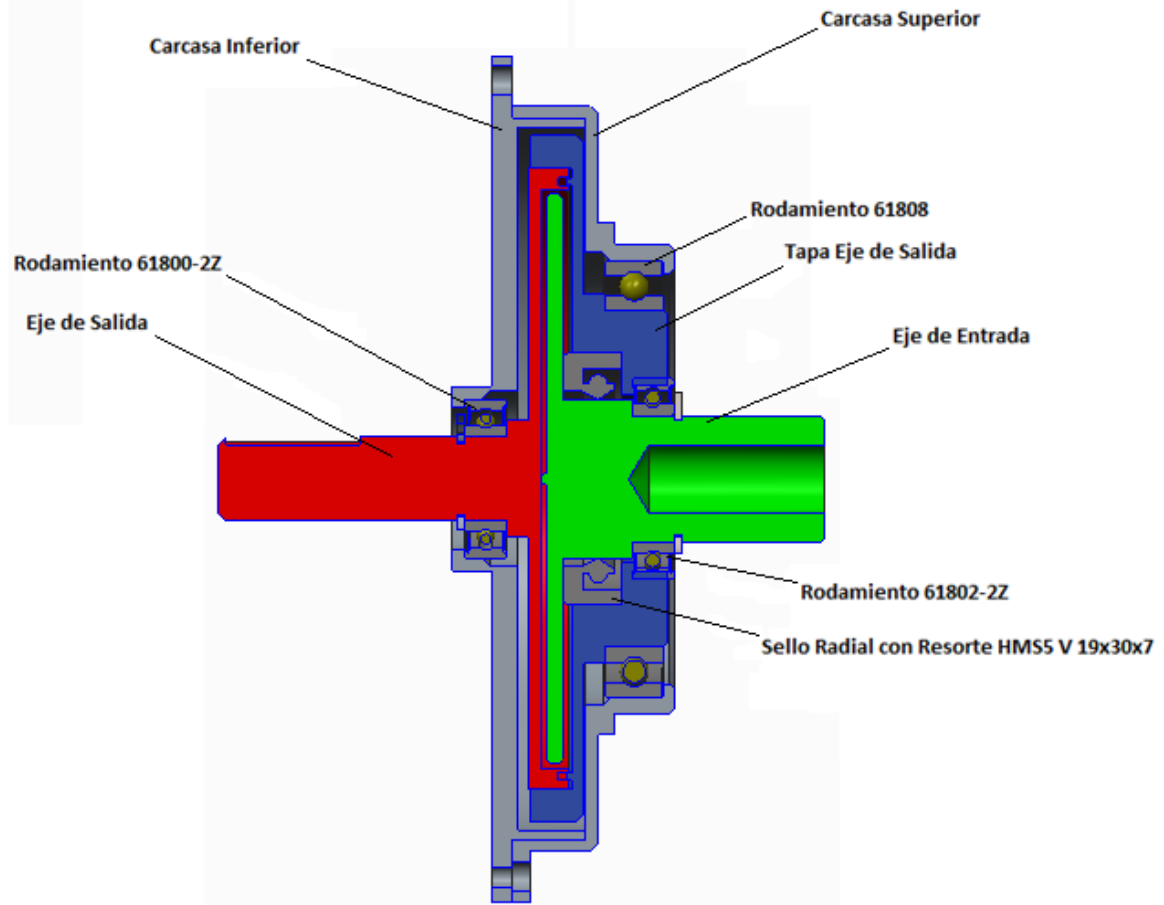


Figura 10.26: Sección embrague modificado.

Capítulo 11

Estudio de generación de campo magnético

11. Estudio de generación de campo magnético

11.1. Requerimientos iniciales de diseño y limitaciones.

Los requerimientos marcados por los responsables del diseño original del embrague magnetorreológico del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática y que han servido como punto de inicio de este proyecto han sido los siguientes:

- El embrague magnetorreológico debe de ser lo más ligero, sencillo y barato posible. El primero de ellos se debe a que al tratarse de un dispositivo portátil que va a ser utilizado en rehabilitación de lesiones humanas, es necesario que sea lo más cómodo y práctico posible.

Por otra parte, junto a este embrague se usa como accionamiento un motor ultrasónico con apenas 250 gramos de peso, por tanto la reducción de peso conseguida usando este tipo de motor no se debe penalizar diseñando un embrague demasiado pesado. Además de lo anterior, si el dispositivo es lo más sencillo posible también será más económico al disminuir los costes de fabricación.

- Para la generación de campo magnético necesario para cambiar las propiedades reológicas del fluido, se debe utilizar un dispositivo con las dimensiones lo más reducidas posibles y con unos requerimientos eléctricos ajustados. Se han contemplado en este proyecto la utilización de solenoides, electroimanes e imanes permanentes. Todo esto está relacionado con los requerimientos del apartado anterior, ya que un dispositivo de generación de campo magnético voluminoso y pesado penalizaría de forma notable la ligereza del embrague magnetorreológico.

Por otra parte, utilizar un bobinado para el solenoide o el electroimán con una alimentación eléctrica elevada conllevaría un calentamiento notable del dispositivo y un consumo de energía a tener en cuenta.

De esta manera, y utilizando los valores descritos en el Capítulo 6 Diseño del Embrague Original y las premisas dictadas por los diseñadores del embrague original, se va a proceder en este apartado a intentar dar solución a los problemas de generación del campo magnético.

Los requerimientos de diseño iniciales son los siguientes:

- El par de diseño que es necesario transmitir del eje de entrada al eje de salida es de **3,2 N·m** a una velocidad de **37,5 rpm**.
- El bobinado actual del solenoide utilizado es de **400 vueltas** utilizando una alimentación de **5 A**. Con este dispositivo de generación de campo magnético escasamente se puede transmitir **1 N·m**.
- Para transmitir el par requerido es necesario que el fluido magnetorreológico adquiera una cierta tensión de fluencia o 'Yield Stress' al magnetizarlo. Inicialmente esta tensión tangencial se encuentra comprendida entre **40 y 50 KPa**, obteniéndose en su momento de manera experimental.

Con estos datos de partida, se tratará de mejorar el dispositivo encargado de generar el campo magnético necesario.

11.2. Análisis teórico del campo magnético generado por un solenoide.

11.2.1. Tensión cortante transmitida por fluido magnetorreológico usando un solenoide.

En el caso de utilizar un solenoide como medio generador de campo magnético **B**, se produce el cambio de las propiedades reológicas de todo el volumen de fluido magnetorreológico. Esto se traduce en que toda superficie en contacto con el fluido va a ser capaz de transmitir par gracias al esfuerzo tangencial producido entre este y los discos de los ejes de entrada y salida.

En este primer caso, se va a considerar que únicamente existen 2 superficies de fricción en contacto con el fluido, las cuales se detallan en esta figura:

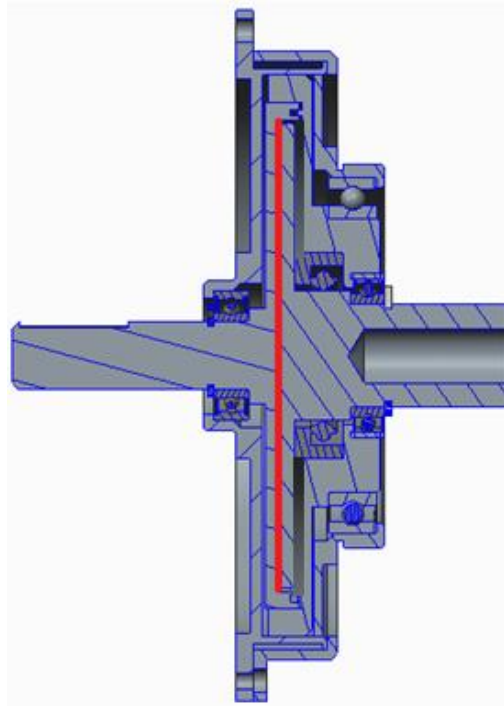


Figura 11.1: Sección de ejemplo con 2 superficies de contacto.

Como se puede observar en color rojo, en esta primera hipótesis solo transmitirá par el disco del eje de entrada y el disco del eje de salida en contacto con el fluido. La geometría que adquirirá el fluido magnetorreológico será un cilindro de radio **R = 34,5 mm** y de altura igual a la distancia que se encuentren separados los discos de los ejes.

La tensión cortante producida en un fluido magnetorreológico bajo la acción de un campo magnético puede ser calculada según la siguiente fórmula:

$$\tau = \tau_b(B) + \eta \frac{\partial V}{\partial y} \quad (11.1)$$

La tensión cortante va a depender de dos términos:

- $\tau_b(B)$: Limite elástico a cortadura dependiente del campo magnético que excita el fluido magnetorreológico.
- $\eta \frac{\partial V}{\partial y}$: Tensión cortante dependiente de η y V , y solo considerada en el caso que $B = 0 \text{ T}$.

El campo magnético generado por un solenoide en el fluido magnetorreológico va a depender de la distancia r (distancia al eje de simetría del solenoide) como se demostró en el Capítulo 5 cuando se habló de generalidades de los campos electromagnéticos y se encuentra explicado de forma extensa en el Anexo 1.

De este modo, la ecuación anterior puede transformarse en una relación entre la tensión cortante transmitida por el fluido magnetorreológico y la coordenada radial r , en lugar de ser dependiente del campo magnético B :

$$B = B(r) \quad \rightarrow \quad \tau = \tau_b(r) + \eta \frac{\partial V}{\partial y} \quad (11.2)$$

En el momento que circule corriente por el solenoide y en consecuencia, se genera campo magnético a su alrededor, el termino $\eta \frac{\partial V}{\partial y}$ pasa a ser despreciable respecto al valor que adquiere $\tau_b(r)$.

La condición límite para transmitir el par máximo es que, en el extremo del disco del eje de salida, es decir, cuando $r = R = 34,5 \text{ mm}$, se dé la siguiente condición:

$$\tau(R) = \tau_{max} \quad (11.3)$$

Se considera este punto debido a que en el extremo del disco va a ser el lugar donde la tensión tangencial necesaria para transmitir el par requerido va a ser máxima. En este punto, debe generarse campo magnético B suficiente para que la tensión tangencial que es capaz de transmitir el fluido magnetorreológico se encuentre por encima de su propio límite de fluencia ('Yield Stress') y pueda transmitir el par requerido.

De esta manera, se debe obtener una relación que permita determinar la variación de la tensión cortante en función del par requerido T y de la distancia r que va a ser variable a lo largo de un radio.

Por resistencia de materiales, es conocido que la tensión cortante varia de manera lineal a lo largo del radio en un cilindro cuando actúa un par de torsión axial T . Es nula en el eje y máxima en el perímetro.

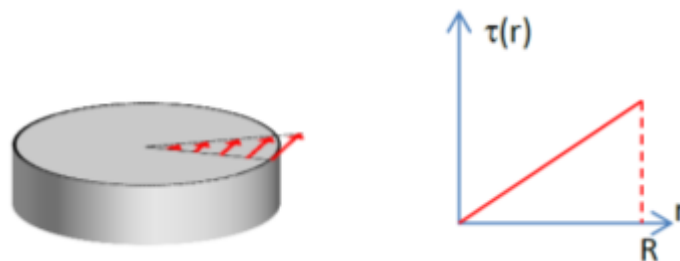


Figura 11.2: Variación tensión cortante en función del radio en un cilindro.

Por tanto:

$$\tau(r) = \tau_{max} \cdot \frac{r}{R} \quad (11.4)$$

El par transmitido por un elemento de cilindro a la distancia r resulta ser:

$$dT = \tau(r) \cdot 2\pi r^2 \cdot dr \quad (11.5)$$

Integrando entre 0 y r , se obtiene el par máximo transmitido cuando el fluido magnetorreológico se encuentra en presencia de un campo magnético externo B :

$$T = \int_0^r \tau(r) \cdot 2\pi r^2 \cdot dr = \int_0^r \tau_{max} \cdot \frac{r}{R} \cdot 2\pi r^2 \cdot dr \quad (11.6)$$

Resolviendo la integral se obtiene que:

$$T_{Max} = \frac{1}{2} \cdot \tau_{max} \cdot \frac{\pi r^4}{R} \quad (11.7)$$

Si $r = R$:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \tau_{max} \cdot \pi R^3 \quad (11.8)$$

Obteniendo el valor de τ_{max} en función de T :

$$\tau_{max} = \frac{2 \cdot T}{\pi R^3} \quad (11.9)$$

Sustituyendo finalmente en la ecuación original, se tiene la variación de la tensión cortante en función del par y la coordenada radial:

$$\tau(r) = \frac{2 \cdot T}{\pi R^4} \cdot r \quad (11.10)$$

Esta última ecuación va a resultar muy importante en el estudio debido a que va a ser la recta de diseño que va a determinar los requerimientos eléctricos y magnéticos necesarios para poder transmitir el par requerido por el embrague.

El proceso de cálculo para obtener estos requerimientos eléctricos y magnéticos que va a solicitar el embrague, se va a basar en las gráficas del Capítulo 5, las cuales describen el comportamiento del fluido magnetorreológico en función de estos parámetros.

El esquema de trabajo es el siguiente:

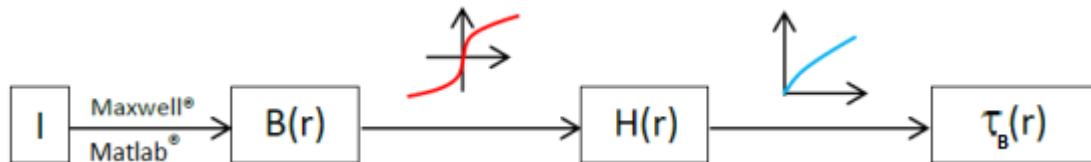


Figura 11.3: Esquema de trabajo para obtener la tensión cortante en función del radio.

Dada una intensidad I y un radio de solenoide, se calcula el campo magnético variable a lo largo de la coordenada r que éste genera. Posteriormente, a través de las gráficas que caracterizan el cambio de propiedades del fluido en función del campo magnético generado y de la intensidad de campo magnético, se va a obtener la curva requerida de variación de tensión tangencial en función del radio r .

De la familia de curvas $\tau_B(r, I_i)$, la que corresponde a la intensidad límite, I_{lim} , debe cumplirse que $\tau_B(r, I_i) > \tau(r)$ (recta de diseño) en todo el dominio del material magnetorreológico, $r < R$. En el caso de la figura, sería la tangente a la recta $\tau(r)$:

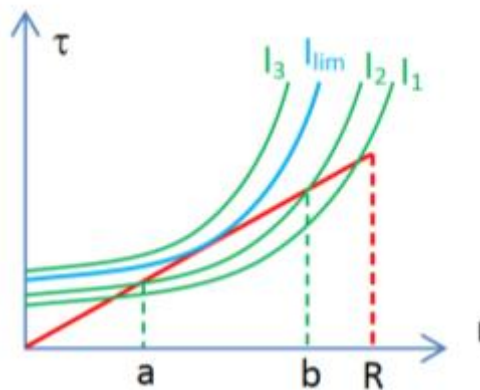


Figura 11.4: Familia de gráficas tensión cortante frente al radio.

De hecho, si se considera una intensidad menor, como por ejemplo I_2 , se obtiene que el material magnetorreológico efectivo (un cilindro de radio a más un casquete cilíndrico de radios interno, b , y externo R) es INESTABLE, ya que la tensión cortante necesaria para resistir el mismo par de torsión aplicado es siempre superior a la inicial (correspondiente a todo el cilindro efectivo).

En definitiva, en cuanto la intensidad de corriente sea inferior a I_{lim} se produce la “ruptura” completa del material magnetorreológico y el consiguiente desembague bajo el par T

11.2.2. Cálculo con Matlab del punto teórico de diseño.

En este apartado vamos a obtener unos parámetros de diseño para determinar cuáles deben de ser las características eléctricas y constructivas del solenoide para poder generar el campo magnético B necesario y en consecuencia, transmitir el par requerido.

Como se mencionaba en el apartado anterior, se va a partir de la ecuación teórica que calcula el campo magnético B generado por un solenoide en cualquier punto de su interior al pasar una corriente I . Dicha ecuación, se encuentra desarrollada en el Anexo 1 y programada en Matlab para resolver mediante cálculo numérico las integrales elípticas que la componen. Esta programación se encuentra también adjunta en el Anexo 2.

De esta forma se van a partir de diferentes $N \times I$ (número de vueltas del solenoide multiplicado por la intensidad que circula), sabiendo que por el solenoide actual se hace pasar una corriente de **5 A**. El esquema de procedimiento seguido es el mostrado en la figura 11.3.

La recta de diseño con la que se compara las curvas $\tau(r, I_i)$ será la siguiente:

$$\tau(r)_{diseño} = \frac{2 \cdot T}{\pi R^4} \cdot r \quad (11.11)$$

Sustituyendo valores:

$$\tau(r)_{diseño} = \frac{2 \cdot T}{\pi R^4} \cdot r = \frac{2 \cdot 3,2 (N \cdot m)}{\pi \cdot 0.034^4 (m^3)} \cdot r = 1437,98 \cdot r (KPa) \quad (11.12)$$

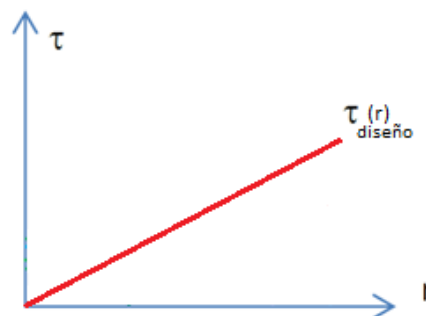


Figura 11.5: Recta de diseño.

Se iniciará el estudio con un primer valor de $N \times I$ de **60.000 A x Vueltas**:

60.000 A x Vueltas

Con el programa CampoEspira realizado en el Anexo 2 e introduciendo un valor de radio de espira de **0.062 m** y una intensidad de **60.000 A x vueltas** se obtiene la grafica mostrada a continuación:

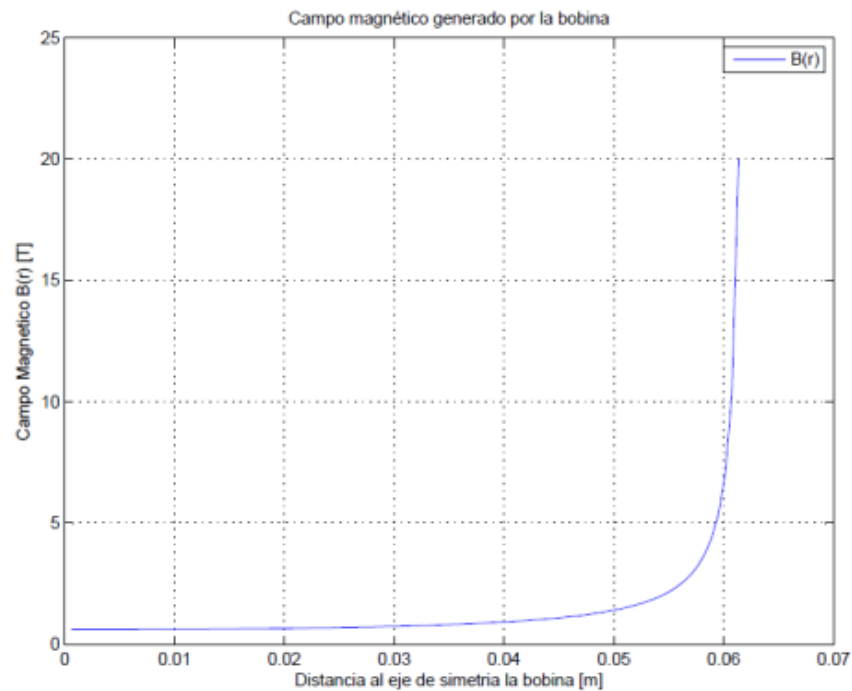


Figura 11.6: Gráfica B(r) para 60.000 N x V's.

Esta gráfica representa la variación del campo magnético **B** en función de la coordenada radial **r** en el interior de la espira de radio e intensidad introducidas.

Obteniendo valores de la gráfica anterior y utilizando las curvas características del comportamiento del fluido magnetorreológico, se obtienen las graficas que representan la intensidad del campo magnético **H** frente al radio **r**:

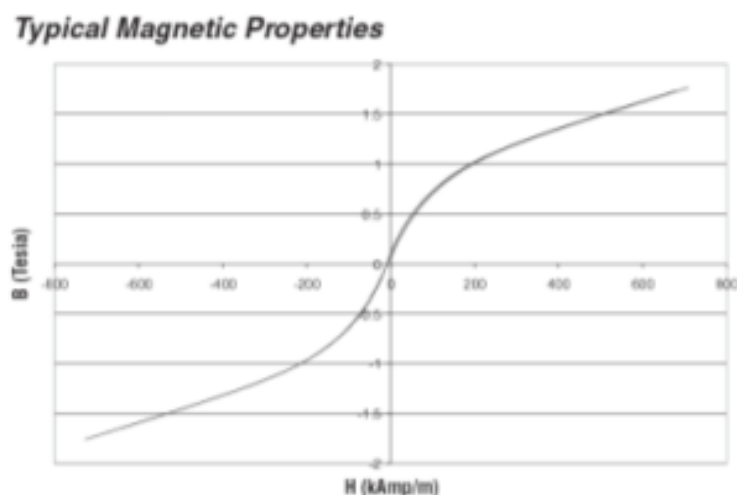


Figura 11.7: Relación B y H fluido magnetorreológico

Para obtener mayor exactitud a la hora de obtener los valores, se han parametrizado las curvas en Matlab, obteniéndose las relaciones que se exponen en la siguiente tabla para cada valor de r:

Radio r (m)	B (T)	H (A/m ²)
0,01	0,621	78
0,015	0,638	80
0,02	0,659	85
0,025	0,697	94
0,03	0,747	108
0,035	0,822	128
0,04	0,931	168
0,045	1,105	255

Tabla 11.1: Tabla valores de r, B y H para NxI de 60000 Ax V's.

Del mismo modo, a través de la grafica que relaciona la intensidad del campo magnético **H** con la tensión de fluencia o 'Yield Stress', se obtiene finalmente la relación deseada:

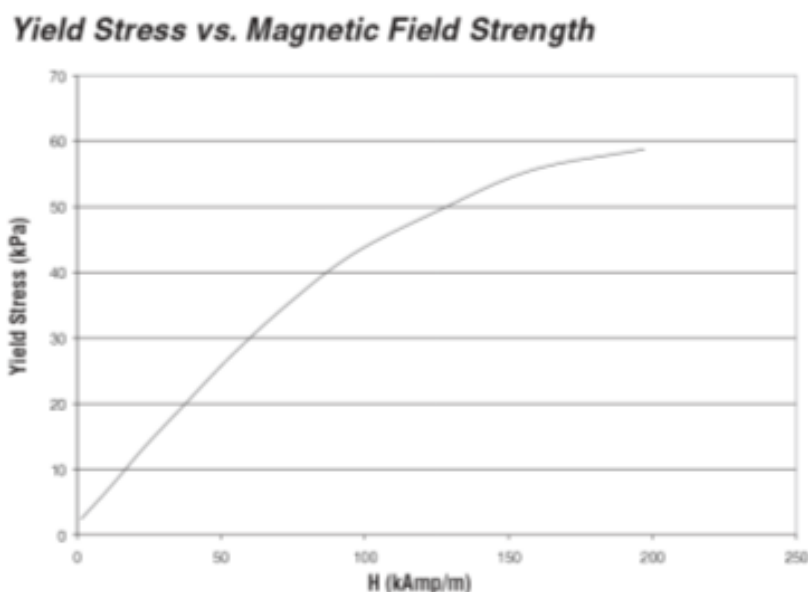


Figura 11.8: Relación límite de fluencia (τ) y campo H .

La tabla que contiene todos los parámetros en función de la distancia radial es la siguiente:

Radio r (m)	B (T)	H (A/m ²)	τ (KPa)
0,01	0,621	78	36,361
0,015	0,638	80	37,045
0,02	0,659	85	38,710
0,025	0,697	94	41,539
0,03	0,747	108	45,516
0,035	0,822	128	50,298
0,04	0,931	168	56,692
0,045	1,105	255	-

Tabla 11.2: Tabla valores de r , B , H y τ para Nxl de 60000 Ax V's.

Utilizando la herramienta de análisis estadístico que proporciona Matlab, se puede obtener una ecuación que relacione τ y r introduciendo los puntos obtenidos a partir de las transformaciones con las gráficas del fabricante LORD.

De este modo, ya se puede obtener la gráfica de enteros $\tau(r, I_{60.000})$ en función del radio r :

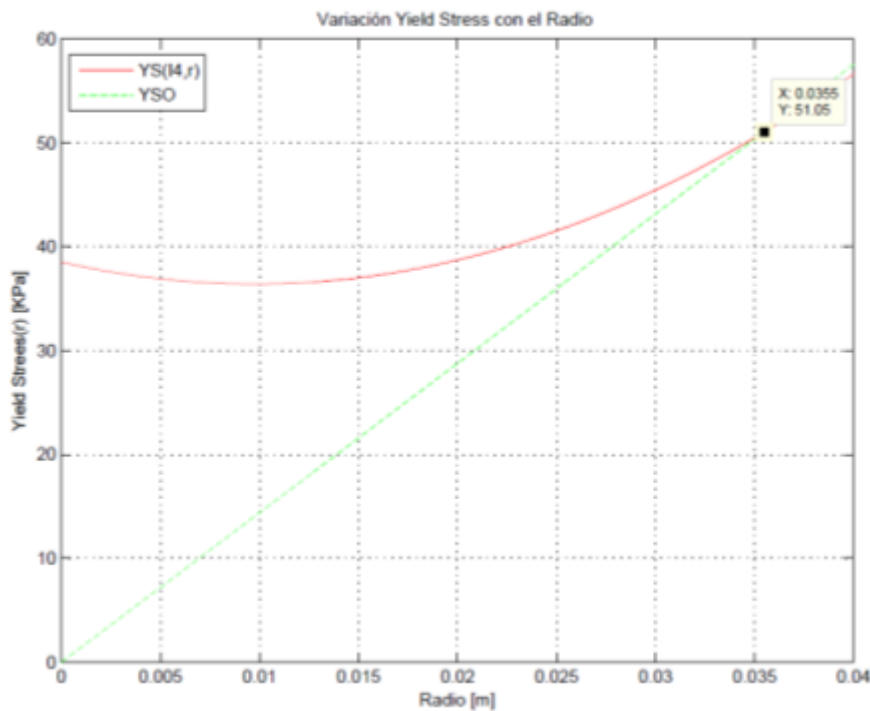


Figura 11.9: $\tau(r, I_{60.000})$ comparada con recta de diseño.

La ecuación que describe el comportamiento de esta curva es la siguiente:

$$\tau(r) = 38,5 - 431,9 \cdot r + 22110 \cdot r^2 \quad (11.13)$$

Como se puede observar, el punto de corte de la recta $\tau(r, I_{60.000})$ con la recta de diseño, proporciona un límite de fluencia de **51,05 KPa** para un radio de **0,0355 m**. Eso se traduce en que todo punto de fluido magnetorreológico que se encuentre por debajo de **0,0355 m** de radio desde el eje del solenoide, va a ser capaz de transmitir el par requerido de **3,2 N·m** al encontrarse por debajo del límite elástico. En otras palabras, por debajo de **0,0355 m** el fluido se encuentra suficientemente magnetizado y en consecuencia, suficientemente viscoso para transmitir el par solicitado.

Con esta grafica, concluye el análisis para el primer punto de estudio.

55.000 A x Vueltas

Al igual que se ha hecho con el punto anterior, con el programa CampoEspiras realizado en el Anexo 2 e introduciendo un valor de radio de espira de **0.062 m** y una intensidad de **55.000 A x vueltas** se obtiene la grafica mostrada a continuación:

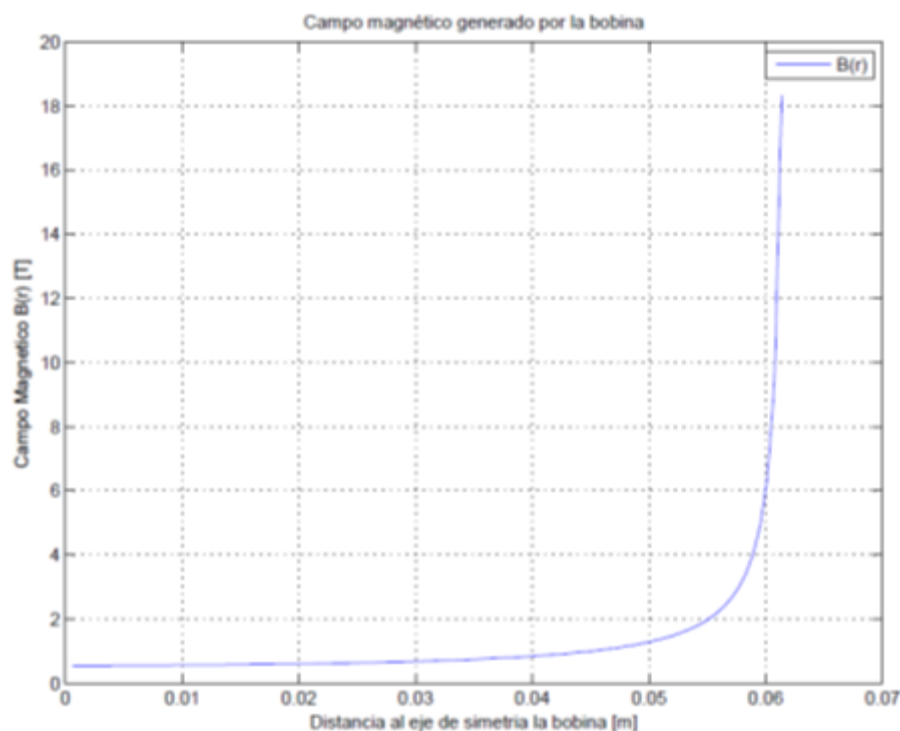


Figura 11.10: Gráfica $B(r)$ para $55.000 \text{ N} \times \text{V's}$.

De nuevo, utilizando las gráficas que describen el comportamiento del fluido magnetorreológico cuando se encuentra bajo la acción de un campo magnético, se obtiene esta tabla resumen que relaciona todas las variables de interés en función de la variable radial:

Radio r (m)	B (T)	H (A/m ²)	τ (KPa)
0,01	0,568	67	32,408
0,015	0,588	71	33,883
0,02	0,605	73	34,604
0,025	0,636	80	37,046
0,03	0,681	90	40,309
0,035	0,744	105	44,708
0,04	0,853	138	52,293
0,045	1,013	207	-

Tabla 11.3: Tabla valores de r , B , H y τ para $N \times l$ de $55000 \text{ A} \times \text{V's}$.

Utilizando de nuevo la herramienta de análisis estadístico que proporciona Matlab, se puede obtener una ecuación que relacione τ y r introduciendo los puntos obtenidos a partir de las transformaciones con las graficas.

De este modo, la gráfica $\tau(r, I_{55.000})$ en función del radio r es la siguiente:

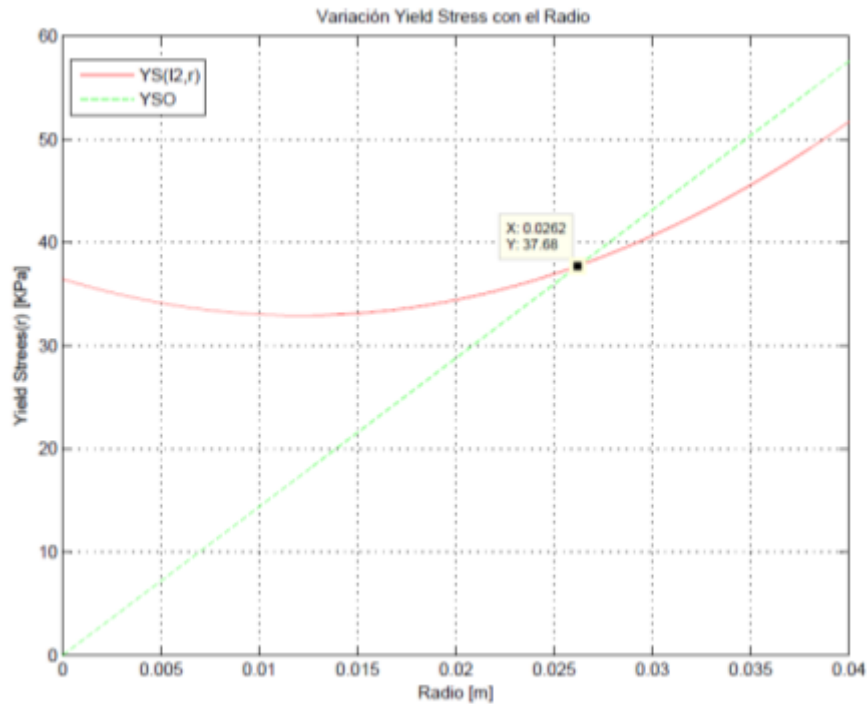


Figura 11.11: $\tau(r, I_{55.000})$ comparada con recta de diseño.

La ecuación que describe el comportamiento de esta curva es:

$$\tau(r) = 36,43 - 582,8 \cdot r + 24090 \cdot r^2 \quad (11.14)$$

Como se puede observar, el punto de corte de la recta $\tau(r, I_{55.000})$ con la recta de diseño, proporciona un límite de fluencia de **37,68 KPa** para un radio de **0,0262 m**. Eso se traduce en que todo punto de fluido magnetorreológico que se encuentre por debajo de **0,0262 m** de radio desde el eje del solenoide, va a ser capaz de transmitir el par requerido de **3,2 N·m** al encontrarse por debajo del límite elástico.

En este caso, a diferencia del punto anterior $\tau(r, I_{60.000})$, la zona de fluido magnetorreológico que se encuentra comprendida entre un radio de **0,0262 m** y **0,0345 m** no va a ser capaz de transmitir el par requerido debido a que no se encuentra suficientemente magnetizado para tener un límite elástico mínimo.

Con esta grafica, concluye el análisis para el segundo punto de estudio.

52.000 A x Vueltas

Del mismo que los puntos anteriores, con el programa CampoEspira realizado en el Anexo 2 e introduciendo un valor de radio de espira de **0.062 m** y una intensidad de **52.000 A x vueltas** se obtiene la grafica mostrada a continuación:

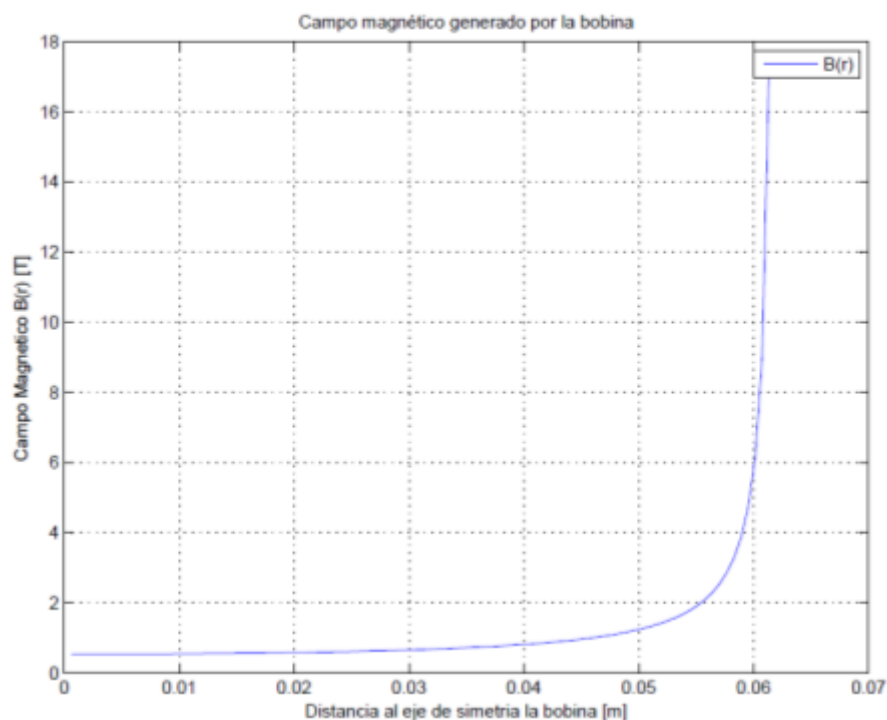


Figura 11.12: Gráfica $B(r)$ para 52.000 N x V's.

De nuevo, se obtiene esta tabla resumen que relaciona todas las variables de interés en función de la variable radial:

Radio r (m)	B (T)	H (A/m ²)	τ (KPa)
0,01	0,547	63	30,892
0,015	0,561	66	32,033
0,02	0,582	70	33,518
0,025	0,613	75	35,315
0,03	0,659	85	38,710
0,035	0,721	99	43,019
0,04	0,815	125	49,649
0,045	0,972	187	-

Tabla 11.4: Tabla valores de r , B , H y τ para $N \times l$ de 52000 Ax V's.

De este modo, la gráfica de enteres $\tau(r, I_{52.000})$ en función del radio r es:

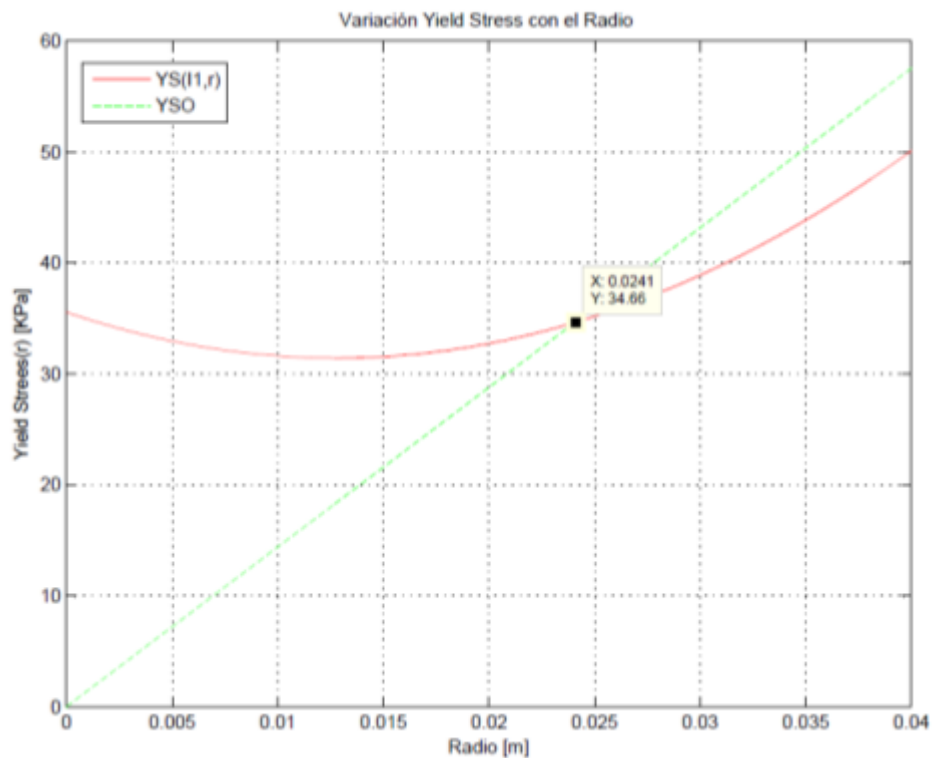


Figura 11.13: $\tau(r, I_{52.000})$ comparada con recta de diseño.

La ecuación que describe el comportamiento de esta curva es la siguiente:

$$\tau(r) = 35,54 - 645,5 \cdot r + 25220 \cdot r^2 \quad (11.15)$$

Como se puede observar, en este caso el punto de corte de la recta $\tau(r, I_{52.000})$ con la recta de diseño, proporciona un límite de fluencia de **34,66 KPa** para un radio de **0,0241 m**. Eso se traduce en que todo punto de fluido magnetorreológico que se encuentre por debajo de **0,0241 m** de radio desde el eje del solenoide, va a ser capaz de transmitir el par requerido de **3,2 N·m** al encontrarse por debajo del límite elástico.

En este caso, a diferencia del punto anterior $\tau(r, I_{52.000})$, la zona de fluido magnetorreológico que se encuentra comprendida entre un radio de **0,0241 m** y **0,0345 m** no va a ser capaz de transmitir el par requerido debido a que no se encuentra suficientemente magnetizado para tener un límite elástico mínimo.

A modo de resumen, las tres graficas de estudio $\tau(r, I_i)$ junto la recta de diseño para las condiciones necesarias de funcionamiento del embrague, queda representado en la siguiente imagen:

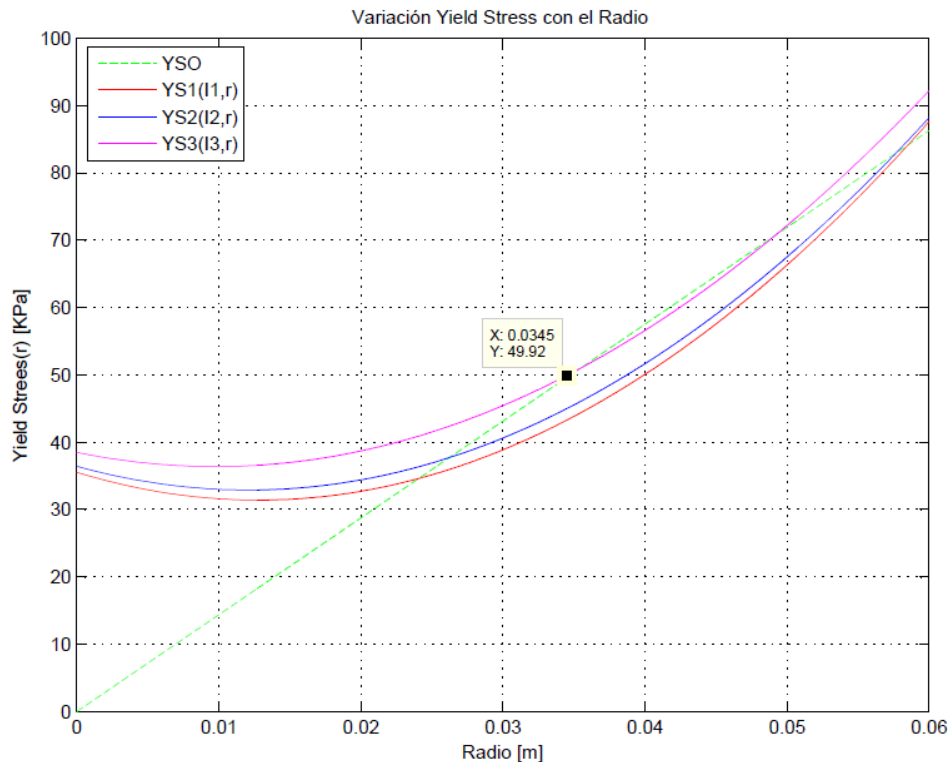


Figura 11.14: $\tau(r, I_i)$ comparadas con recta de diseño.

Como se puede observar, del conjunto de curvas $\tau(r, I_i)$ representadas, la que cumple los requerimientos de diseño es la curva $\tau(r, I_{60.000})$. De esta manera, se acaban de obtener unos parámetros de diseño iniciales para utilizar como dispositivo generador de campo magnético un solenoide. En siguiente tabla, aparece resumido el punto de trabajo óptimo en función de los resultados obtenidos en las gráficas y tablas:

Punto óptimo de trabajo teórico
$T = 3,2 \text{ N}\cdot\text{m}$
$I = 5 \text{ A}$
Nº de vueltas = 12.000 vueltas
Punto límite de transmisión = 0,0345 m
$\tau_{y,s} = 49,52 \text{ KPa}$
$B = 0,82 \text{ T}$

Tabla 11.5: Tabla resumen punto óptimo de trabajo con 1 superficie de fricción.

Este cálculo se ha realizado aproximando el solenoide a una espira circular plana. En el siguiente apartado se pasará a simular el comportamiento del fluido magnetorreológico cuando el campo es generado por una distribución de corriente más realista (bobina de sección rectangular) utilizando el software de simulación de campos magnéticos Ansys Maxwell.

11.2.3. Simulaciones con Maxwell utilizando un solenoide.

11.2.3.1. Simulación con eje de entrada de hierro.

Para comenzar las simulaciones realizamos con el software Ansys Maxwell, se va realizar en primera instancia un análisis del embrague magnetorreológico utilizando como elemento generador de campo magnético un solenoide de sección rectangular y conservando los materiales de diseño originales, es decir, todos los componentes fabricados en aluminio salvo el eje de entrada que estará realizado de hierro.

Para simplificar la geometría introducida en las simulaciones, únicamente se han insertado el eje de entrada y salida, la tapa del eje de salida, el fluido magnetorreológico con las propiedades que proporcionan las gráficas de comportamiento, la bobina suponiendo que circula por ella una corriente de **$N \times I$ de 60.000 A x Vueltas** y el aire de alrededor del embrague para ver que incidencia tiene sobre este.

La geometría propuesta es la siguiente:

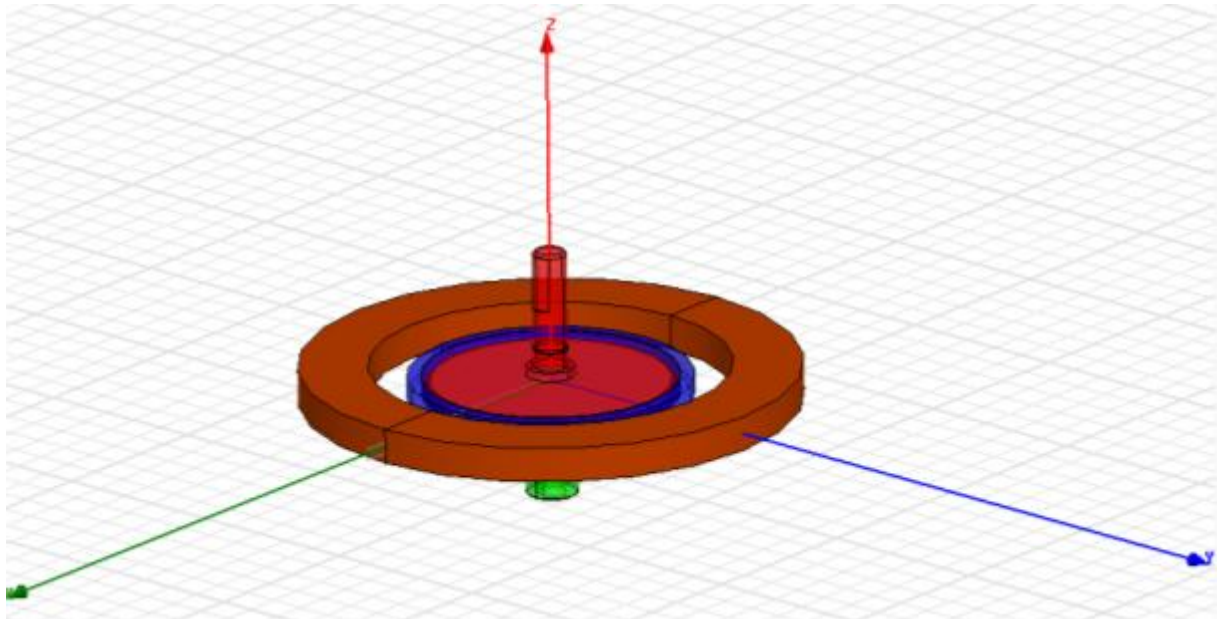


Figura 11.15: Vista 3D modelo propuesto de simulación.

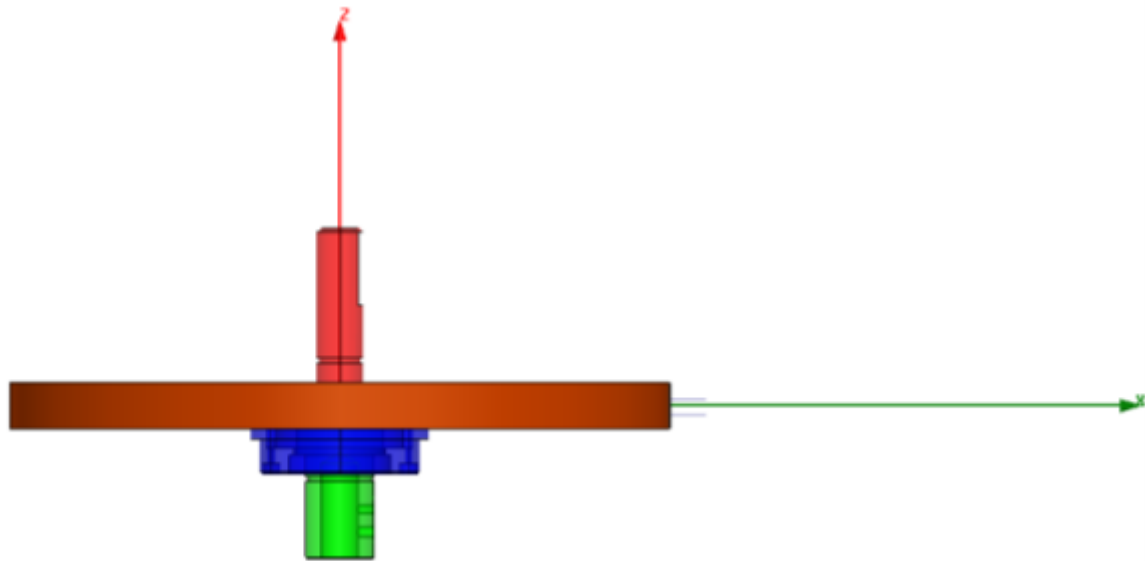


Figura 11.16: Modelo propuesto de simulación.

Partiendo de este modelo simplificado, se hace pasar una corriente de **60.000 A x Vueltas** para generar el campo magnético **B**. A continuación, a través de diferentes herramientas de análisis de resultados que proporciona Ansys Maxwell, se analizará si el valor teórico obtenido de **0,82 T** necesarios para satisfacer los requerimientos se cumple.

Partiendo de esta información, la simulación queda de la siguiente manera:

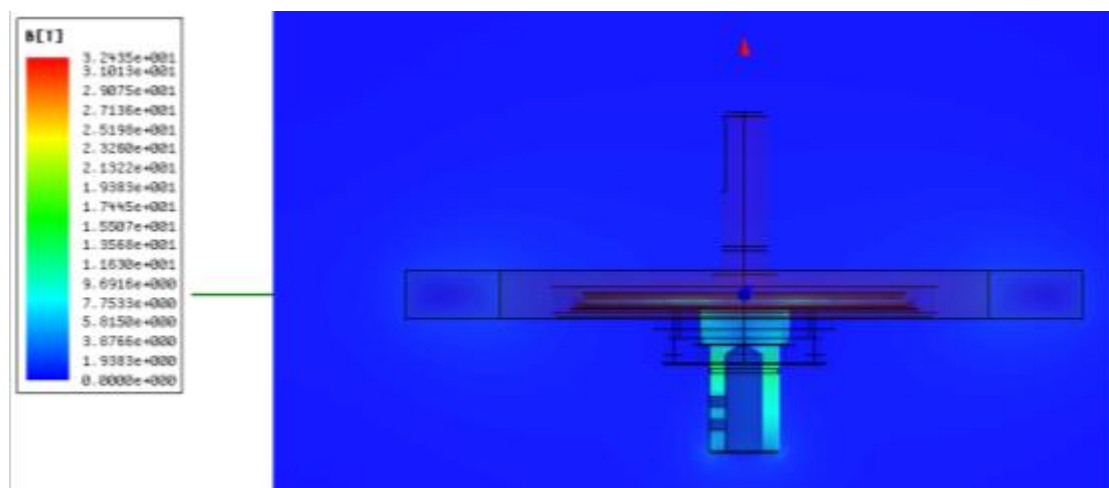


Figura 11.17: Simulación con eje de entrada de hierro.

Como se puede observar realizando un corte por el plano XZ, utilizando un eje de entrada de hierro se produce un incremento del campo magnético en todos los componentes del embrague, especialmente en el eje de entrada como cabe esperar.

Como el componente de interés del embrague es el fluido magnetorreológico, se va a comprobar qué cantidad de campo magnético \mathbf{B} excita a dicho fluido. Para ello, se mostrará una simulación con el vector campo magnético en el fluido y se va a comprobar gráficamente la variación de \mathbf{B} a lo largo de la coordenada radial tal y como se hizo con Matlab anteriormente. La simulación realizada es la que aparece en la siguiente imagen:

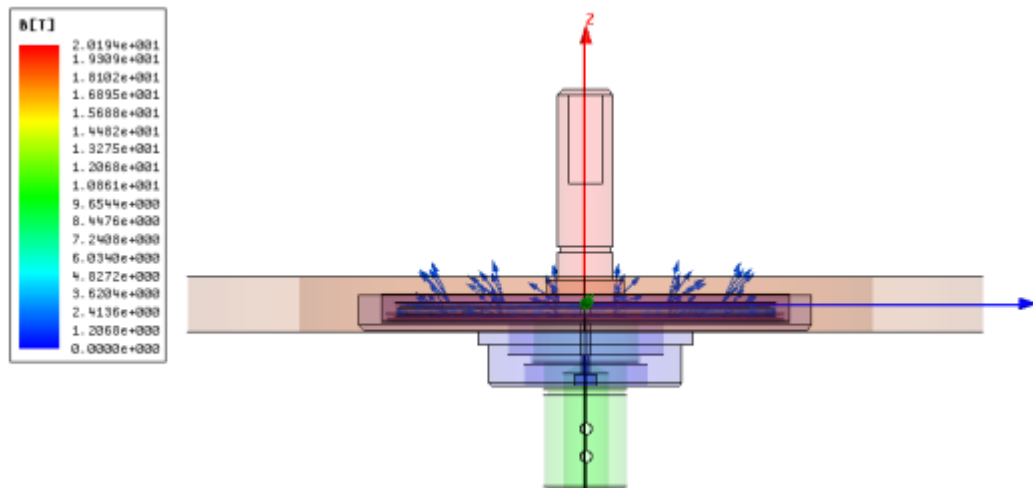


Figura 11.18: Vector \mathbf{B} generado en el fluido con eje de entrada de hierro con 60.000 A x V's.

La grafica que describe la variación del campo magnético \mathbf{B} en el fluido magnetorreológico a lo largo de la coordenada radial es la siguiente:

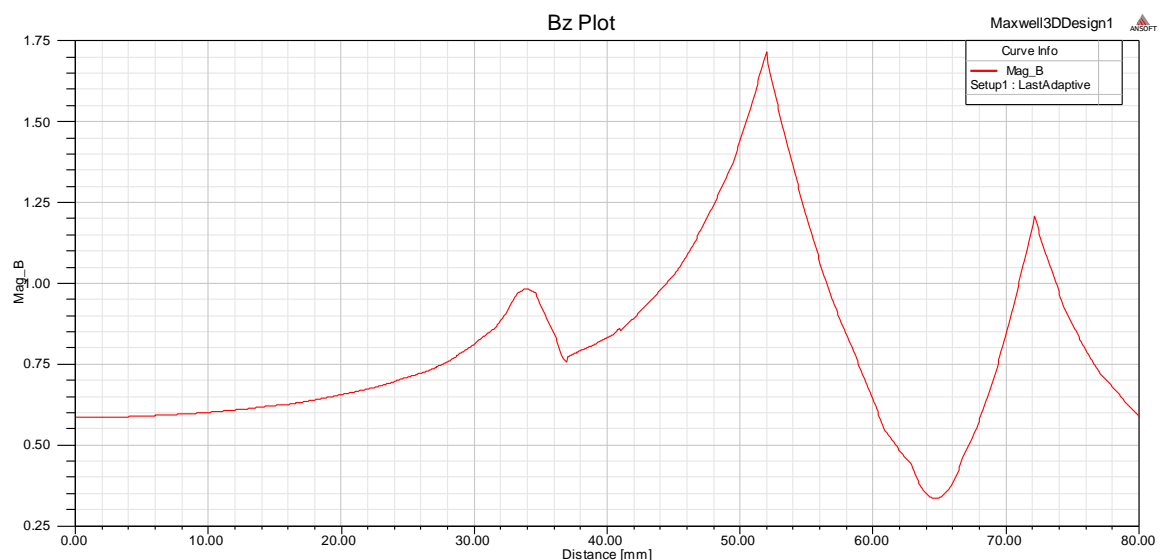


Figura 11.19: Variación de \mathbf{B} según r en fluido magnetorreológico.

Como se puede observar, se va produciendo un incremento del campo magnético que excita al fluido magnetorreológico desde el punto central del embrague hasta su punto final en un radio r con valor **0,0345 m**. En este punto, se observa una disminución del campo B debido a que en ese tramo se encuentra el borde exterior del eje de salida, fabricado en aluminio. Posteriormente, de nuevo comienza a aumentar el campo al encontrarse con el aire que separa el embrague del solenoide, alcanzando su pico máximo de valor al comienzo de este.

Para poder comparar con el valor teórico necesario obtenido en Matlab, es necesario obtener el campo magnético en el extremo del disco del eje de entrada, punto en el cual, el par transmitido es máximo.

	Distance [mm]	Bz Setup1 : LastAdaptive
421	33.600000	0.968504
422	33.680000	0.973730
423	33.760000	0.973520
424	33.840000	0.970074
425	33.920000	0.966227
426	34.000000	0.961978
427	34.080000	0.957328
428	34.160000	0.952277
429	34.240000	0.946825
430	34.320000	0.940971
431	34.400000	0.934716
432	34.480000	0.928060
433	34.560000	0.921003
434	34.640000	0.913544
435	34.720000	0.905655
436	34.800000	0.897715
437	34.880000	0.889805
438	34.960000	0.881924
439	35.040000	0.874073
440	35.120000	0.866252
441	35.200000	0.858461
442	35.280000	0.850700
443	35.360000	0.842969

Tabla 11.6: Tabla de salida Maxwell variación campo magnético B en función del radio r.

El valor obtenido en las simulación para un radio r de **0,0345 mm** es de **0,92 T**, mientras que el valor teórico necesario es **0,82 T**, por lo tanto, el resultado se puede dar como válido. Esta variación se debe a la presencia del eje de entrada fabricado de hierro, el cual tiene un efecto amplificador del campo magnético \mathbf{B} en el seno del solenoide mientras que el análisis teórico realizado con Matlab únicamente tiene en cuenta el campo \mathbf{B} creado por el solenoide y el comportamiento del fluido según las graficas del fabricante, sin considerar en ningún momento con que materiales están realizados el resto de componentes que forman el embrague.

Para obtener qué número de vueltas es necesario que tenga el solenoide, se va a aproximar la simulación de tal manera que el campo magnético generado en r **0,0345 m** sea de **0,82 T**. De esta manera, se procede a realizar la siguiente simulación con un valor de corriente de **53.000 A x Vueltas** tras varias pruebas con distintos valores:

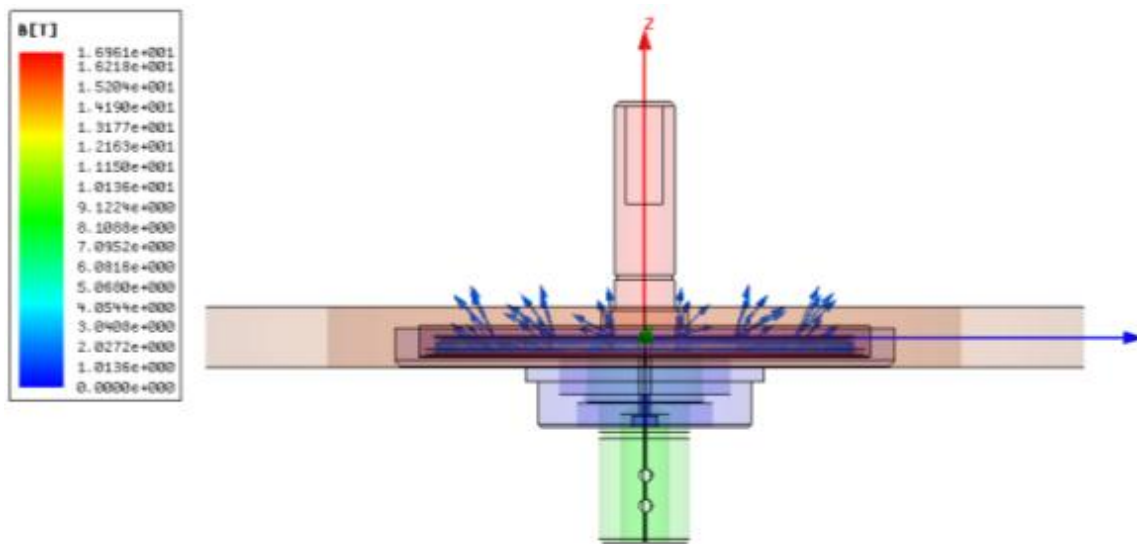


Figura 11.20: Vector \mathbf{B} generado en el fluido con eje de entrada de hierro con 53.000 A x V's.

Observándolo de forma tridimensional en el plano XYZ:

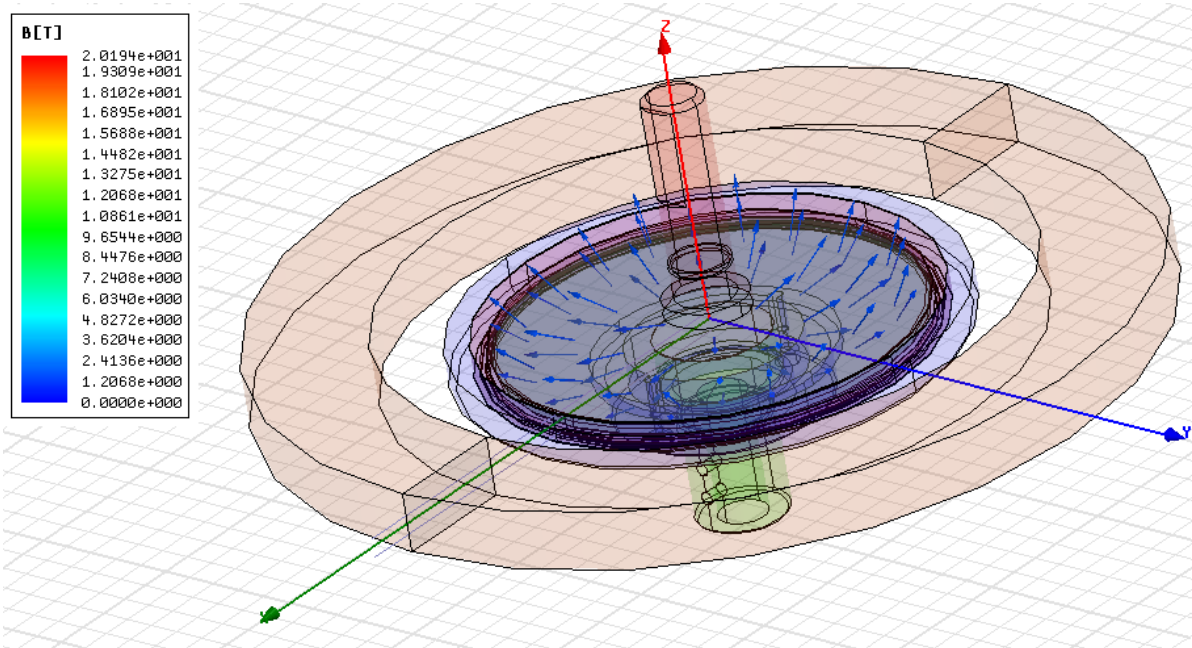


Figura 11.21: Vista tridimensional vector B con eje de entrada de hierro con 53.000 A x V's.

La grafica que describe la variación del campo magnético B en el fluido magnetorreológico a lo largo de la coordenada radial es la siguiente:

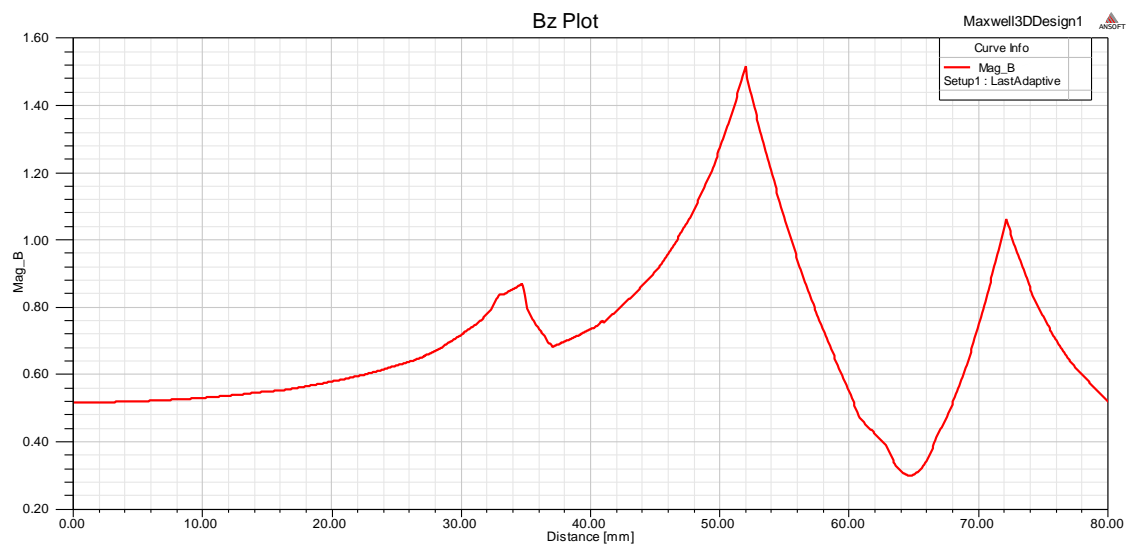


Figura 11.22: Variación de B según r en fluido magnetorreológico.

De nuevo, como en el caso anterior, se comprueba el valor de B en el punto r con valor 0,0345 m.

	Distance [mm]	Bz Setup1 : LastAdaptive
<u>432</u>	<u>34.480000</u>	<u>0.830703</u>
433	34.560000	0.829690
434	34.640000	0.828576
435	34.720000	0.827361
436	34.800000	0.817581
437	34.880000	0.803644
438	34.960000	0.789932
439	35.040000	0.769214
440	35.120000	0.752301
441	35.200000	0.745079
442	35.280000	0.738209
443	35.360000	0.731689
444	35.440000	0.725521
445	35.520000	0.719705
446	35.600000	0.714239
447	35.680000	0.709126
448	35.760000	0.704363
449	35.840000	0.699952
450	35.920000	0.695892
451	36.000000	0.692183
452	36.080000	0.688826
453	36.160000	0.685820
454	36.240000	0.683165

Tabla 11.7: Tabla de salida Maxwell variación campo magnético B en función del radio r.

Como se puede comprobar, el valor de B en un valor de la coordenada radial r de **0,034 m** es **0,82 T**, lo cual indica que con una corriente de **53.000 A x Vueltas** se magnetiza el fluido magnético lo suficiente como para poder transmitir el par requerido de **3,2 N·m**.

11.2.3.2. Simulación con eje de entrada de aluminio.

Del mismo modo que se ha realizado simulaciones con el eje de entrada de hierro, se van a realizar diferentes simulaciones considerando que el embrague está formado íntegramente por piezas de aluminio. En este último caso, el embrague presentaría mejores prestaciones de peso.

Como punto de partida, se va a utilizar de nuevo lo resultado obtenidos en el análisis teórico realizado con Matlab, es decir, se supondrá que circula por el solenoide una corriente **N x I** de **60.000 A x Vueltas**.

Partiendo de esta información, la simulación queda de la siguiente manera:

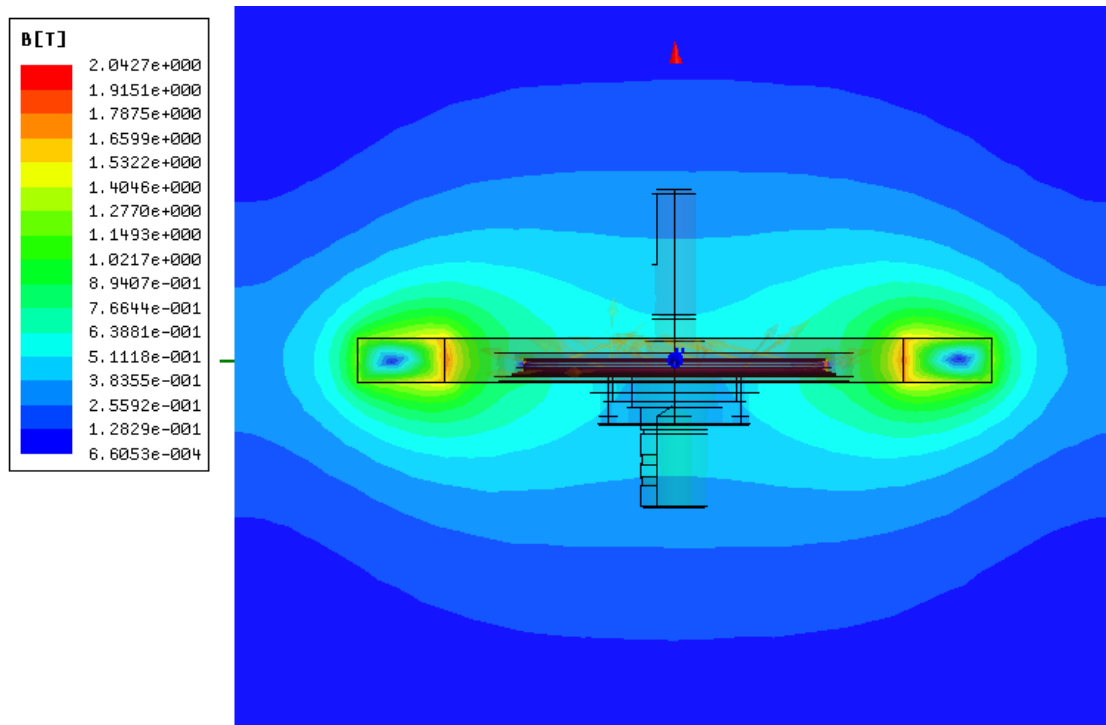


Figura 11.23: Simulación con todas las piezas de aluminio con $N \times I$ de 60.000 A x V's

Como se puede observar realizando un corte por el plano XZ, utilizando los componentes del embrague fabricados en aluminio se produce una propagación del campo magnético mas repartida a diferencia del caso anterior en el cual se utiliza el eje de entrada de hierro. En aquel caso, se observó cómo el hierro intensifica el campo magnético producido en el interior del solenoide, incrementando la intensidad de campo magnético especialmente en el eje de entrada fabricado de dicho material.

Como el componente de interés del embrague es el fluido magnetorreológico, se va a comprobar que cantidad de campo magnético \mathbf{B} excita a dicho fluido. Para ello, se mostrará una simulación con el vector campo magnético en el fluido y se va a comprobar gráficamente la variación de \mathbf{B} a lo largo de la coordenada radial como se hizo con Matlab anteriormente. La simulación realizada es la que aparece en la siguiente imagen:

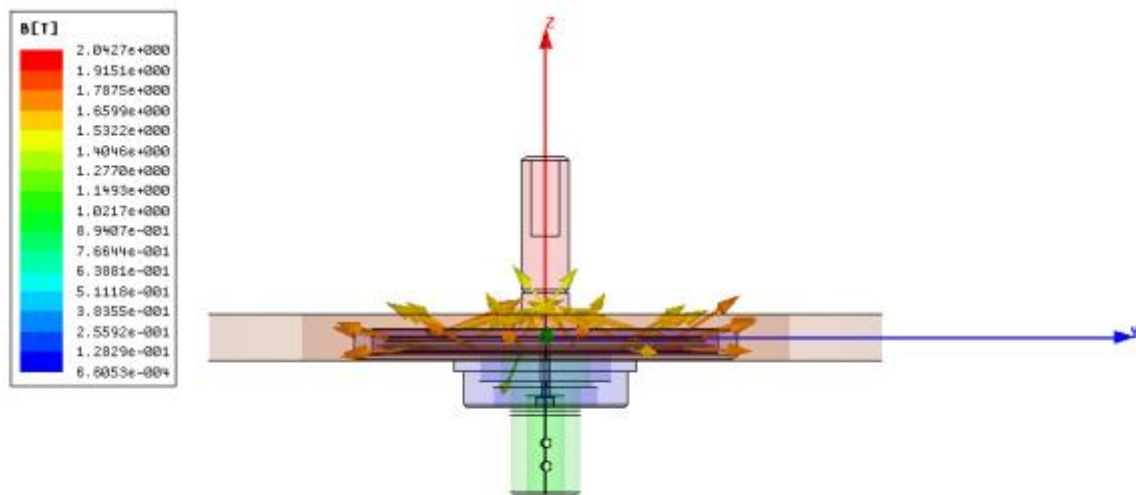


Figura 11.24: Vector \mathbf{B} generado en el fluido con componentes de aluminio y 60.000 A x V's.

Observándolo de forma tridimensional en el plano XYZ:

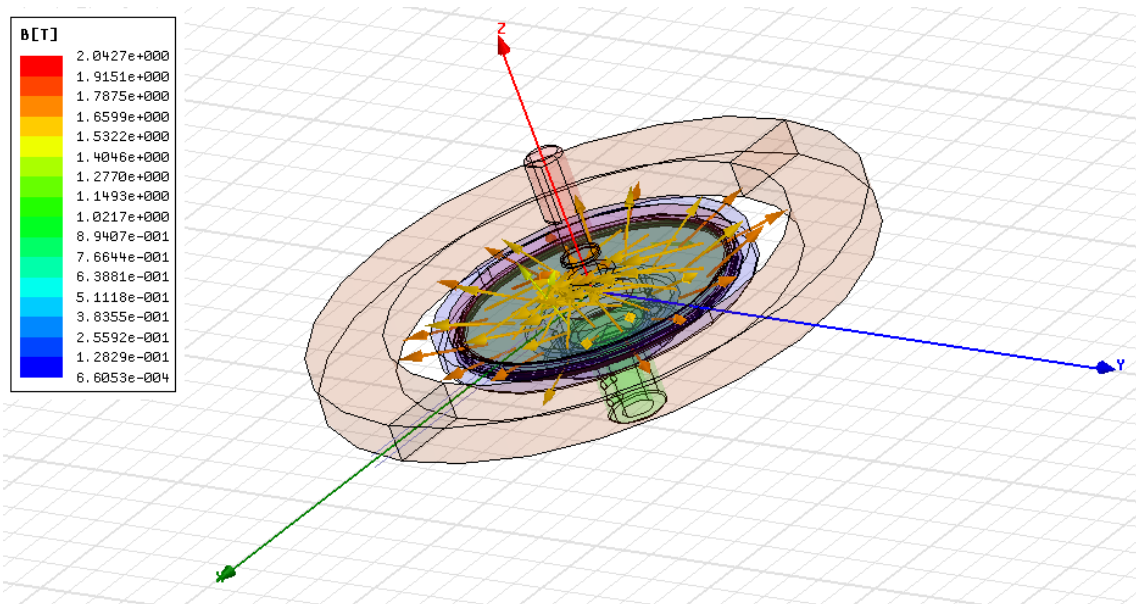


Figura 11.25: Vista tridimensional vector \mathbf{B} generado con componentes de aluminio y 60.000 A x V's.

La grafica que describe la variación del campo magnético **B** en el fluido magnetorreológico a lo largo de la coordenada radial es la siguiente:

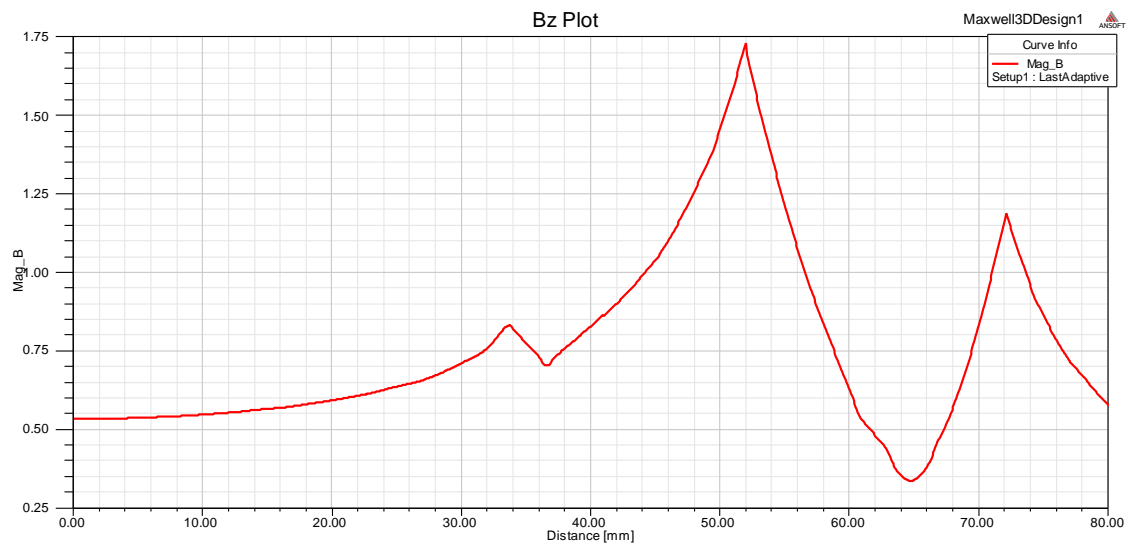


Figura 11.26: Variación de B según r en fluido magnetorreológico.

De nuevo, como en los casos anteriores, se comprueba el valor de **B** en el punto **r** con valor **0,0345 m**.

	Distance [mm]	Mag_B Setup1 : LastAdaptive
421	33.600000	0.827263
422	33.680000	0.829188
423	33.760000	0.831170
424	33.840000	0.827748
425	33.920000	0.823347
426	34.000000	0.819035
427	34.080000	0.814812
428	34.160000	0.810679
429	34.240000	0.806635
430	34.320000	0.802681
431	34.400000	0.798816
432	34.480000	0.795179
433	34.560000	0.792171
434	34.640000	0.789109
435	34.720000	0.785993
436	34.800000	0.782822
437	34.880000	0.779596
438	34.960000	0.776316
439	35.040000	0.772981
440	35.120000	0.769592
441	35.200000	0.766148
442	35.280000	0.762650
443	35.360000	0.759097

Tabla 11.8: Tabla de salida Maxwell variación campo magnético B en función del radio r.

Como se puede comprobar, el valor de **B** en un valor de la coordenada radial **r** de **0,034 m** es **0,79 T**, ligeramente inferior a los **0,82 T** que indicaba el estudio teórico que era necesario aplicar para magnetizar el fluido magnetorreológico. Por lo tanto, como resultado de esta simulación utilizando todos los componentes del embrague de aluminio se obtiene la conclusión que es necesario utilizar una corriente de **60.000 A x Vueltas** para transmitir el par requerido.

Comparando con la simulación realizada utilizando un eje de entrada de hierro, cabe resaltar que utilizando este último es necesario aplicar una corriente inferior, y en consecuencia, utilizar un solenoide con menor número de vueltas para conseguir transmitir el par requerido. Con esta última conclusión, se incluye la siguiente tabla resumen:

Eje de entrada de hierro	Todos los componentes de aluminio
Campo requerido: 0,82 T	
Intensidad necesaria: 53.000 A x V's	Intensidad necesaria: 60.000 A x V's
Corriente aplicable: 5 A	
Número de vueltas: 10.600 Vueltas	Número de vueltas: 12.000 Vueltas

Tabla 11.9: Tabla comparativa punto óptimo de trabajo con 1 superficie de fricción.

11.2.4. Análisis teórico con 2 superficies de fricción.

Si el embrague es como el de la siguiente figura, en el que el material magnetorreológico (en gris) rodea el eje de entrada, hay que considerar la acción de dos discos de material, cada uno de ellos solicitado por la mitad del par a transmitir.

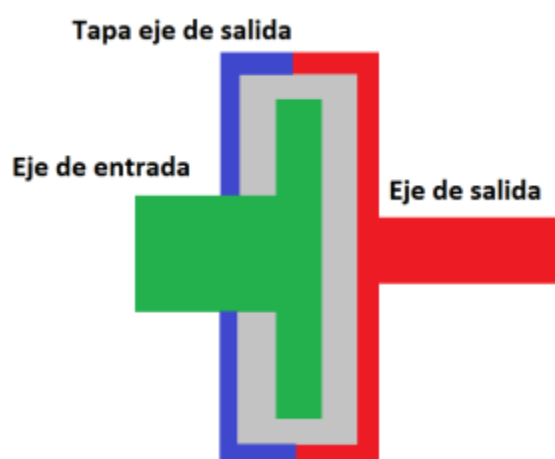


Figura 11.27: Análisis utilizando dos superficies de fricción.

Esto se ha analizado considerando que el eje de entrada posee dos superficies de fricción como en el diseño original del embrague, y suponiendo que tanto el eje de salida como la tapa del eje de salida son solidarios y forman entre sí un único componente transmisor de par con dos superficies. De esta manera, para transmitir el mismo par considerado en los estudios anteriores de **3,2 N·m**, sería suficiente magnetizar el fluido magnetorreológico con un campo **B** inferior al considerado en el caso anterior, ya que al haber dos superficies transmisoras la tensión cortante que solicita el material es menor y, en consecuencia, también es menor la intensidad que debe circular por el solenoide.

Así, la distribución de esfuerzo cortante en cada uno de ellos es aproximadamente:

$$\tau(r) = \frac{T}{\pi \cdot (R^4 - a^4)} \cdot r \quad (11.16)$$

Donde **a** es el radio del eje interno. Nótese que se ha ignorado la acción del material magnetorreológico en **r < a** por el lado del eje de salida (aproximación conservadora, en cualquier caso).

Por lo tanto, la condición de embrague o de integridad para el material magnetorreológico en modo “sólido”, es ahora menos restrictiva:

$$\tau_{y,s}(r, I) > \frac{T}{\pi \cdot (R^4 - a^4)} \cdot r \quad (11.17)$$

Para **r < R**.

De esto modo, sustituyendo los valores conocidos se obtiene de nuevo la siguiente recta de diseño considerando dos superficies transmisoras de par en la entrada y en la salida:

$$\tau(r) = \frac{3,2 \text{ N} \cdot \text{m}}{\pi \cdot (0,0345^4 - 0,0095^4)} \cdot r = 723,15 \cdot r \quad (11.18)$$

Se realizará un nuevo estudio con dos superficies utilizando un valor de **N x I** de **40.000 A x Vueltas**.

Del mismo modo que se realizó en el punto anterior, utilizando las graficas que describen el comportamiento del fluido magnetorreológico cuando se encuentra bajo la acción de un campo magnético, se obtiene esta tabla resumen que relaciona todas las variables de interés en función de la variable radial:

Radio r (m)	B (T)	H (A/m ²)	τ (KPa)
0,01	0,371	36	19,163
0,015	0,378	36	19,163
0,02	0,389	37	19,633
0,025	0,407	40	21,033
0,03	0,429	44	22,874
0,035	0,458	48	24,681
0,04	0,499	55	27,749
0,045	0,568	67	-

Tabla 11.10: Tabla valores de r , B , H y τ para $N \times l$ de 40.000 A x V's.

La nueva curva $\tau(r, I_{40.000})$ se puede parametrizar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\tau(r) = 21,8 - 383,9 \cdot r + 13670 \cdot r^2 \quad (11.19)$$

Del mismo modo que se ha desarrollado considerando que la tapa del eje de salida no es solidaria al eje de salida y no transmite par, se obtiene la gráfica que relaciona $\tau(r, I_{40.000})$ con la recta de diseño:

Como se puede observar en la gráfica, se han representado las curvas anteriores de **60.000**, **55.000** y **52.000 A x Vueltas** y la nueva curva de **40.000 A x Vueltas** suponiendo dos superficies de contacto. De este modo, se puede observar que esta curva corta a la nueva recta de diseño en un punto que requiere un límite de fluencia y por tanto una intensidad de corriente también menor para transmitir el par necesario.

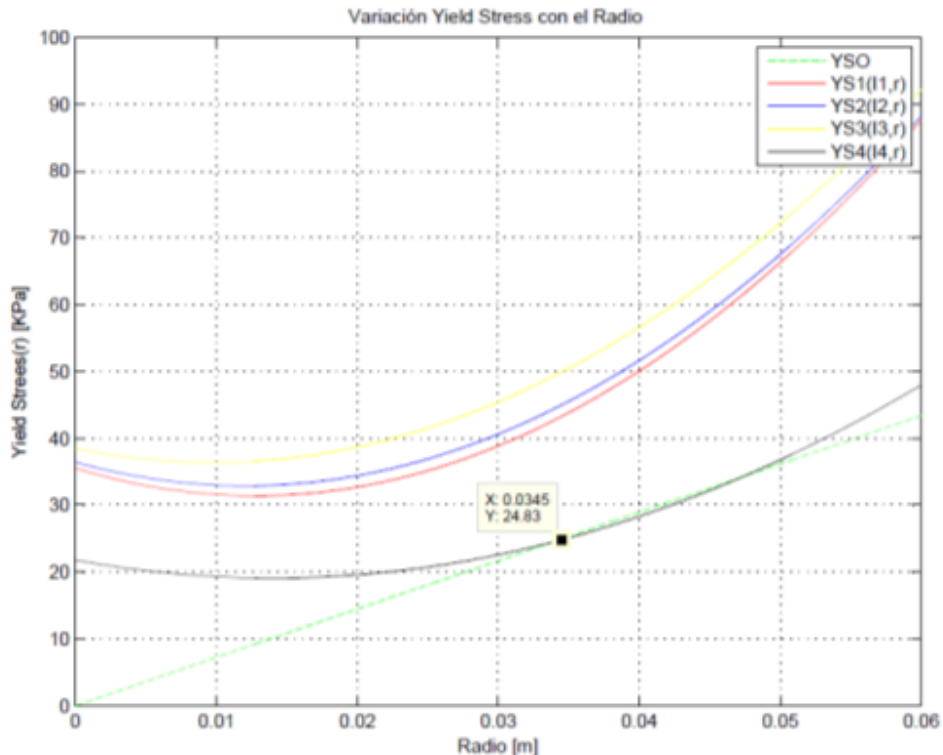


Figura 11.28: $\tau(r, I_i)$ comparadas con recta de diseño con 2 superficies de contacto.

Por tanto, contando que el embrague es capaz de transmitir un par de **3,2 N·m** mediante dos superficies de contacto en el eje de entrada y en el eje de salida, sería necesario realizar un bobinado en el solenoide por el cual circule una corriente de **40.000 A x Vueltas**, que se traduce en **8000 vueltas** de cable circulando por él **5 A**.

De esta forma, y observando la disposición constructiva del embrague magnetorreológico, se puede sacar la siguiente conclusión:

En el caso de utilizar un solenoide como medio generador de campo magnético, es necesario que el embrague disponga de dos superficies de contacto tanto en la entrada del par (eje de entrada) como a la salida de este (eje de salida y tapa eje de salida) para tener que magnetizar el fluido magnetorreológico con menor campo magnético. Además de esto, es necesario que disponga de alguno de sus componentes fabricados en hierro para incrementar la intensidad del campo magnético generado en el interior. En el caso estudiado, se dispone de dos superficies de contacto para transmitir el par necesario, como se muestra en la siguiente imagen (fluido magnetorreológico en rojo):

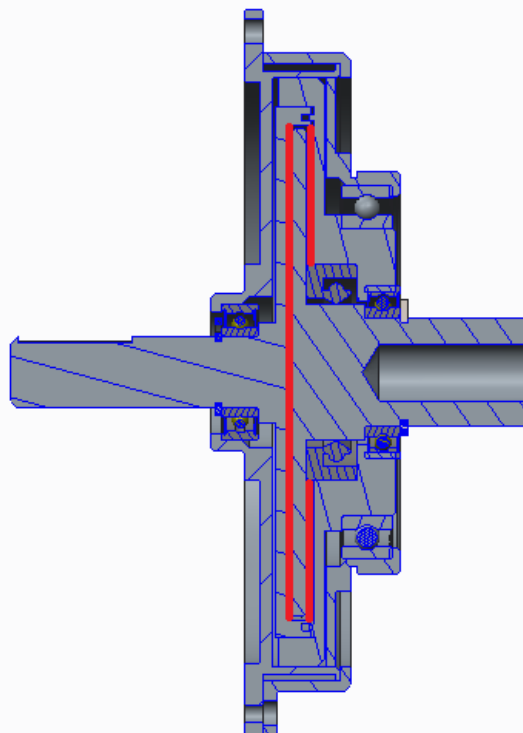


Figura 11.29: Sección de ejemplo con 2 superficies de contacto.

En conclusión, el embrague magnetorreológico diseño originalmente y con las mejoras incorporadas en el capítulo 10, debe magnetizarse utilizando un solenoide por el que circule una intensidad de **40.000 A x Vueltas**, que se traduce en un número total de **8000 vueltas** circulando una intensidad de **5 A**. De esta forma se genera un campo magnético con valor de **0.458 T** para modificar las propiedades reológicas del fluido.

11.2.5. Simulaciones con 2 superficies de fricción y eje de entrada de hierro.

En esta apartado, se va a comprobar con Maxwell si en el punto **0,0345 m** del radio del embrague se consigue un campo magnético de **0,458 T** haciendo pasar una corriente de **40.000 A x Vueltas** y con el eje de entrada fabricado de hierro.

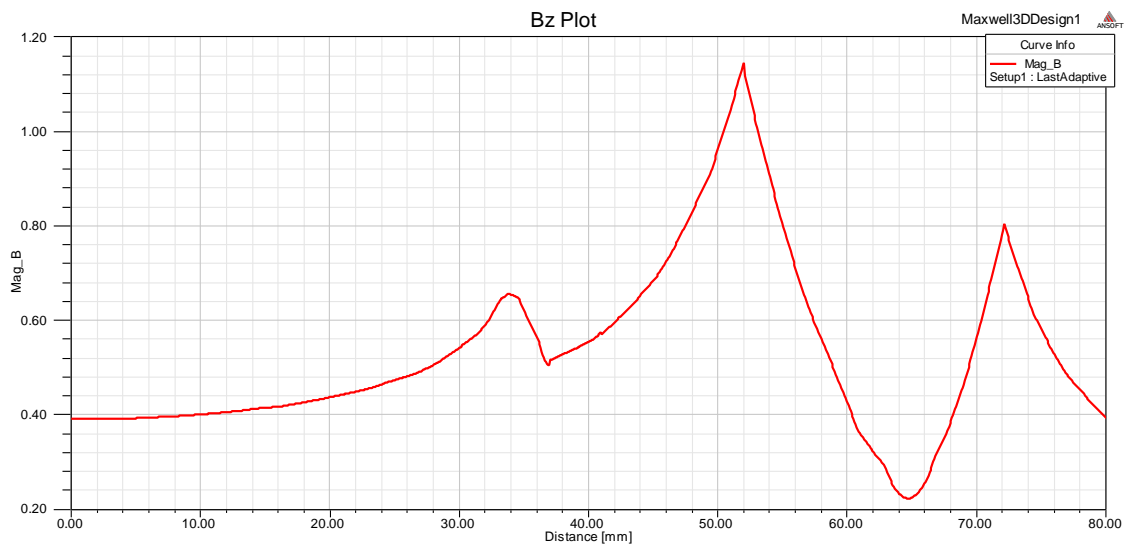


Figura 11.30: Gráfica de simulación suponiendo 2 superficies de fricción.

Observando directamente la grafica que proporciona Maxwell, se obtiene la siguiente conclusión: Para el punto de interés en cuestión en el cual se produce la máxima transmisión de par, Maxwell ofrece resultados según los cuales se genera un total de campo magnético superior a **0,6 T**. Comparando con los datos teóricos según los cuales sería suficiente un campo de **0,458 T** con una corriente de **40.000 A x Vueltas**, se mantiene como resultado válido este último al ser más restrictivo que el simulado. Dicho en otras palabras, si se tiene en cuenta el resultado simulado se podría disminuir el **N x I** que circula por el solenoide a valores inferiores a **40.000 A x Vueltas** para conseguir transmitir el par requerido.

Con esta última conclusión, se incluye la siguiente tabla resumen:

Eje de entrada de hierro y 2 superficies de contacto
$T = 3,2 \text{ N}\cdot\text{m}$
$I = 5 \text{ A}$
Nº de vueltas = 8.000 vueltas
Punto límite de transmisión = 0,0345 m
$\tau_{y,s} = 24,83 \text{ KPa}$
$B = 0,458 \text{ T}$

Tabla 11.11: Punto de diseño utilizando 2 superficies de contacto y eje de entrada de hierro.

11.3. Análisis teórico utilizando electroimanes.

En este apartado, se va a proceder a analizar en profundidad la utilización de electroimanes como fuente de generación de campo magnético. Este apartado estará estructurado del mismo modo que para el caso del solenoide, es decir, se realizará un estudio teórico para conocer la recta de diseño del embrague en función de la geometría de éste y del par que es necesario transmitir. Posteriormente, en función de los datos obtenidos, se pasará a realizar simulaciones para corroborar estos resultados teóricos.

11.3.1. Tensión cortante transmitida por el embrague utilizando 2 electroimanes.

El caso de estudio que se presenta en este caso aparece representado en la siguiente imagen:

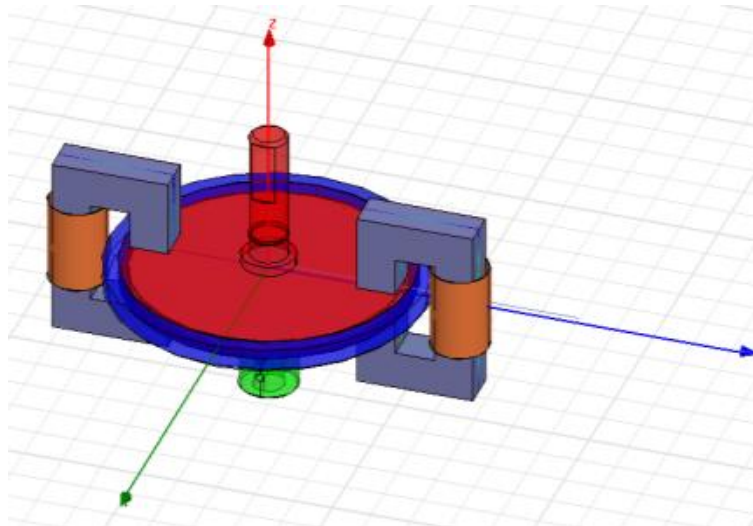


Figura 11.31: Análisis propuesto utilizando 2 electroimanes.

Seccionando la superficie de contacto electroimán-embrague, se presenta la siguiente situación:

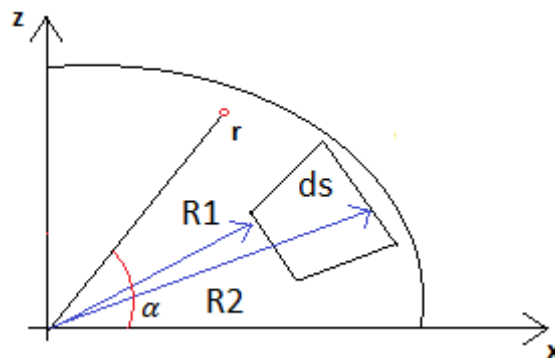


Figura 11.32: Modelo 2D electroimán.

La superficie del electroimán que en la realidad es cuadrada se aproximará a un sector circular de radios **R1** y **R2**, con sus caras laterales completamente paralelas y separadas un ángulo **dα**.

De esta manera, para realizar el estudio, se ha supuesto un electroimán con un área cuadrada de **1 cm²**, o dicho de otro modo, la sección del núcleo será un cuadrado de lado **1 cm**. Fuera de esta área del electroimán, se despreciará el campo magnético.

Los radios **R1** y **R2** serán, considerando que el electroimán se sitúa en el extremo del eje de entrada, **0,0245** y **0,0345 m** respectivamente, formando un ángulo **α** de **0,408 radianes**.

Del mismo mod que se analizó anteriormente, se supondrá una distribución lineal de tensión cortante:

$$\tau(r) = \tau_{max} \cdot \frac{r}{R} \quad (11.20)$$

El par transmitido en función de **τ(r)**, cambiando el diferencial a coordenadas polares resulta ser:

$$dT = dF \cdot r = \tau(r) \cdot dS \cdot r = \tau(r) \cdot r^2 \cdot dr d\alpha = \tau_{max} \cdot \frac{r^3}{R} \cdot dr d\alpha \quad (11.21)$$

Integrando entre **R1** y **R2**, y considerando el ángulo **α** se obtiene el par transmitido:

$$T = \int_{R1}^{R2} \int_0^{\alpha} \tau_{y,s} \cdot \frac{r^3}{R} \cdot dr d\alpha = \alpha \cdot \tau_{max} \cdot \frac{(R_2^4 - R_1^4)}{R} \quad (11.22)$$

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene de nuevo la tensión tangencial en función de la coordenada radial **r**:

$$\tau(r) = \frac{T}{\alpha \cdot (R_2^4 - R_1^4)} \cdot r \quad (11.23)$$

Dependiendo del número total de electroimanes, la superficie de contacto electroimán-embrague ira multiplicado por **n**.

$$\tau(r) = \frac{T}{n \cdot \alpha \cdot (R_2^4 - R_1^4)} \cdot r \quad (11.24)$$

Sustituyendo valores:

$$\tau(r) = \frac{3,2 \text{ N} \cdot \text{m}}{n \cdot 0,408 \text{ rad} \cdot (0,0345^4 - 0,0245^4) \text{ m}^4} \cdot r = \frac{7424,44}{n} \cdot r(\text{m}) \text{ (KPa)} \quad (11.25)$$

Sustituyendo para el caso de 2 electroimanes como en la figura 11.32 y para el caso de máxima transmisión de par en r con valor **0,0345 m** se obtiene que la tensión tangencial necesaria es la siguiente:

$$\tau = \frac{7424,44}{2} \cdot 0,0345 \text{ m} = 128,07 \text{ KPa} \quad (11.26)$$

Este resultado ofrece una conclusión muy interesante. El fluido magnetorreológico, para la geometría del embrague y los 2 electroimanes diseñados con una superficie de **1 cm²** no es capaz de transmitir el par requerido debido a la elevada tensión tangencial solicitada a las pequeñas áreas de fluido bajo acción del campo magnético. Este hecho, queda reflejado en las gráficas de comportamiento del fluido:

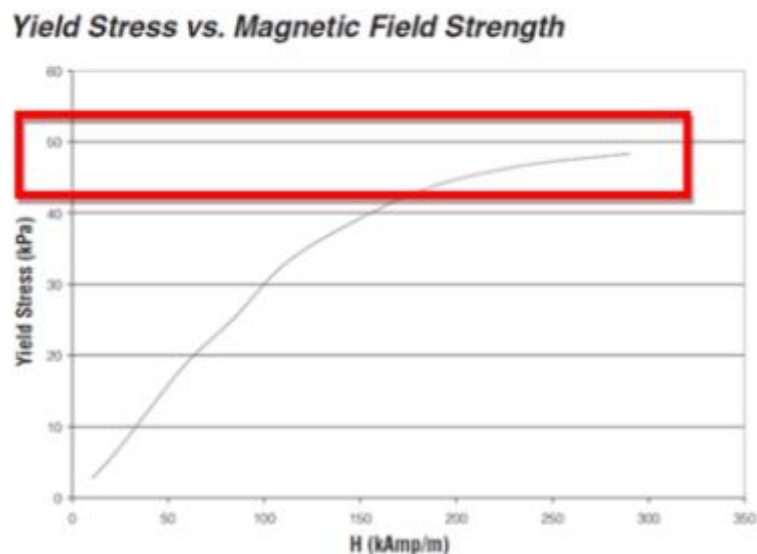


Figura 11.33: Valor máximo de tensión tangencial del fluido magnetorreológico.

Por otro lado, para el caso de utilizar 4 electroimanes, se presenta la siguiente situación:

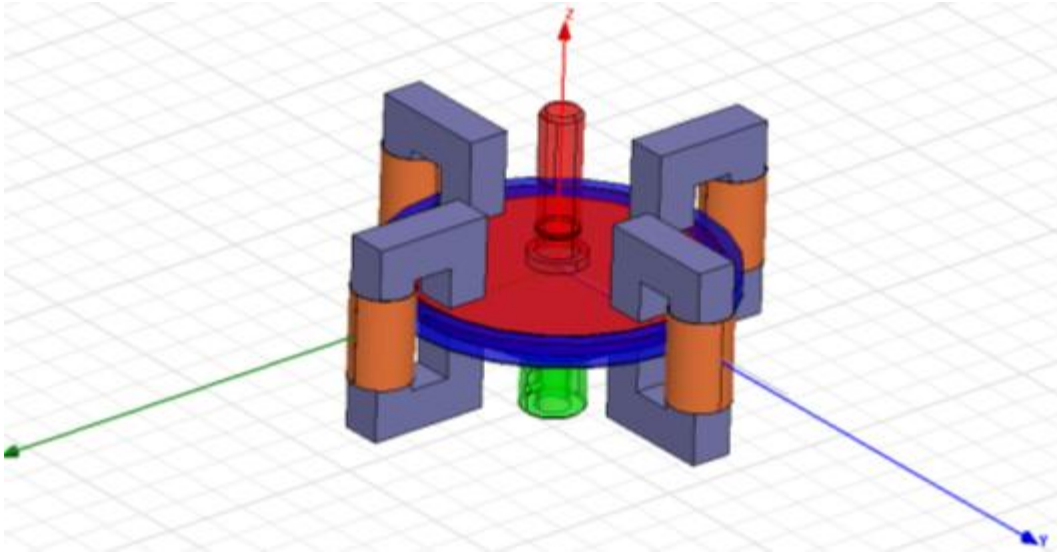


Figura 11.34: Análisis propuesto utilizando 4 electroimanes.

Operando del mismo modo:

$$\tau = \frac{7424,44}{4} \cdot 0,0345 \text{ m} = 64,03 \text{ KPa} \quad (11.27)$$

En definitiva, tanto en el caso de utilizar 2 electroimanes como 4, no va a ser posible transmitir el par solicitado al embrague por ruptura del fluido magnetorreológico. Se podría solucionar este problema, incrementando la sección del núcleo de hierro del electroimán o añadiendo mayor cantidad de electroimanes.

Cualquiera de estas dos soluciones penalizaría de forma notoria el requisito de utilizar un dispositivo de reducido peso, por lo tanto, esta opción de utilizar electroimanes queda descartada.

11.3.2. Simulaciones utilizando 2 electroimanes.

A pesar de haber descartado esta opción, es interesante realizar un comparativo de variación del campo **B** a lo largo de la coordenada radial utilizando los electroimanes como dispositivo generador de campo magnético frente al solenoide.

De esta manera, suponiendo por ejemplo, que cada uno de los electroimanes está formado por un núcleo de hierro con una sección cuadrada de **1 cm²** y una bobina por la que circula una corriente de **230 A x Vueltas**, se tiene la siguiente situación:

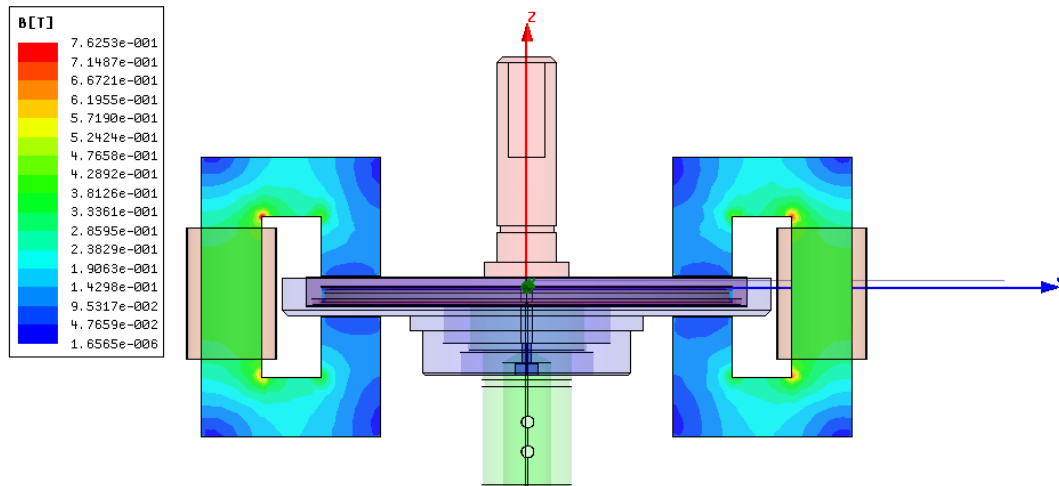


Figura 11.35: Campo magnético generado por 2 electroimanes.

La variación del campo magnético a lo largo de la coordenada radial r sobre la que se encuentra cualquiera de los electroimanes se muestra en la siguiente gráfica:

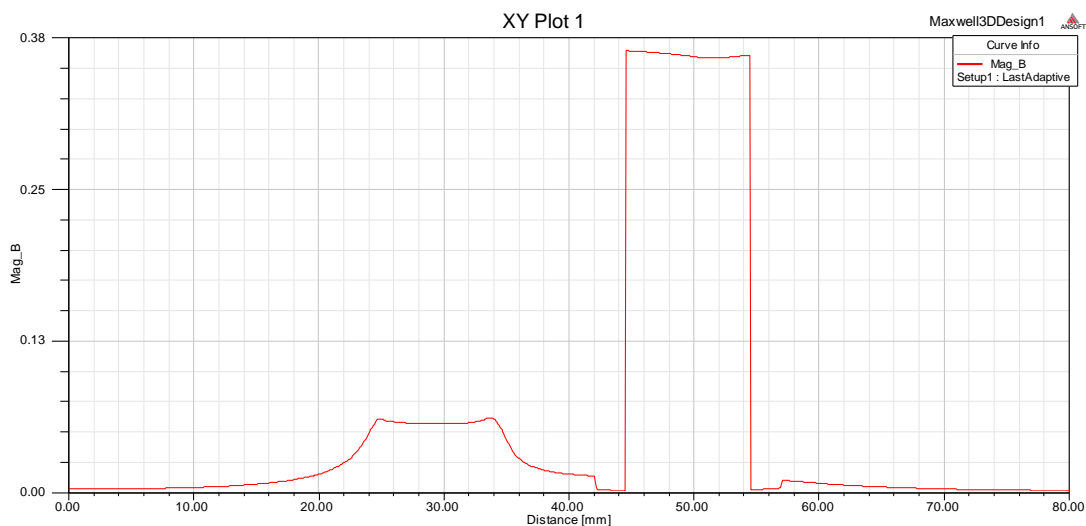


Figura 11.36: Variación de campo magnético B según coordenada r utilizando electroimanes.

Como se puede observar, el campo magnético generado por los electroimanes presenta un comportamiento muy diferente al que genera un solenoide. La transmisión de campo magnético al fluido prácticamente se restringe al área sobre la que se encuentra el núcleo del electroimán en contacto con el embrague y con un valor constante. El otro campo de gran valor que se observa en la grafica, corresponde a los de r que se encuentran encerrado entre el bobinado y el entrehierro del electroimán.

No obstante, estos datos obtenidos en las simulaciones son irrelevantes debido a que no va a ser posible transmitir el par requerido por muy alto que sea el valor del campo que incide sobre el fluido.

11.4. Uso de imanes permanente como fuente generadora de campo magnético.

La generación de campo magnético **B** utilizando imanes permanentes ha sido una de las principales propuestas de estudio para este proyecto que han realizado los responsables de diseño del embrague original.

El uso de imanes permanentes ha sido una de las soluciones que se ha contemplado desde el principio y se ha investigado acerca de su utilización en este embrague magnetorreológico. Para entender si su uso o no es adecuado para implementarlo en el embrague magnetorreológico es necesario estudiar una serie de conceptos relacionados con ellos:

11.4.1. Generalidades sobre imanes

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro u otros metales como cobalto y níquel. Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales. En un imán la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos [17].

Estos materiales presentan propiedades ferromagnéticas, que como se comentó en el capítulo 5, son aquellos que tienden a orientar sus dominios magnéticos en la misma dirección que el campo magnético externo y por tanto se convierten en imanes.

Los parámetros de interés a la hora de estudiar el comportamiento de los imanes son los siguientes:

Coercitividad Intrínseca (H_s): Valor del campo, medido en **A/m**, que indica la resistencia de un material a la desimanación. El valor máximo se obtiene tras haber llevado el imán a saturación.

Coercitividad (H_{ci}): Es la resistencia de un material magnético a la desimanación. Es el valor de **H** que anula la inducción magnética o la emanación y se mide en **A/m**.

Curva de Histéresis: Es la curva cerrada obtenida al medir la imantación **M** cuando se somete al imán a un campo magnético **H**, describiendo un ciclo completo entre los límites definidos por la inducción o la imantación de saturación del primer cuadrante al tercer cuadrante

Entrehierro: Es el espacio magnético entre los polos de un imán, que puede ser rellenada con cualquier material no magnético, como latón, madera, o plástico.

Remanencia (B_r): Es la imantación residual del imán que ha sido imantado hasta la saturación en un circuito cerrado. B_r , y corresponde a la inducción magnética que queda en el material magnético después de ser imantado a saturación y preparado para su uso final.

Temperatura de Curie (T_c): Es la temperatura por encima de la cual los materiales ferromagnéticos se vuelven paramagnéticos, perdiendo sustancialmente todas sus propiedades magnéticas permanentes. Depende normalmente de la composición química del material magnético

11.4.2. Curva de histéresis

La figura siguiente [18] describe esquemáticamente la respuesta magnética del material M ferromagnético en una dirección, en función del campo magnético exterior efectivo H que incide sobre el material en esa dirección. El ciclo $M(H)$ corresponde a la representación de M vs. H .

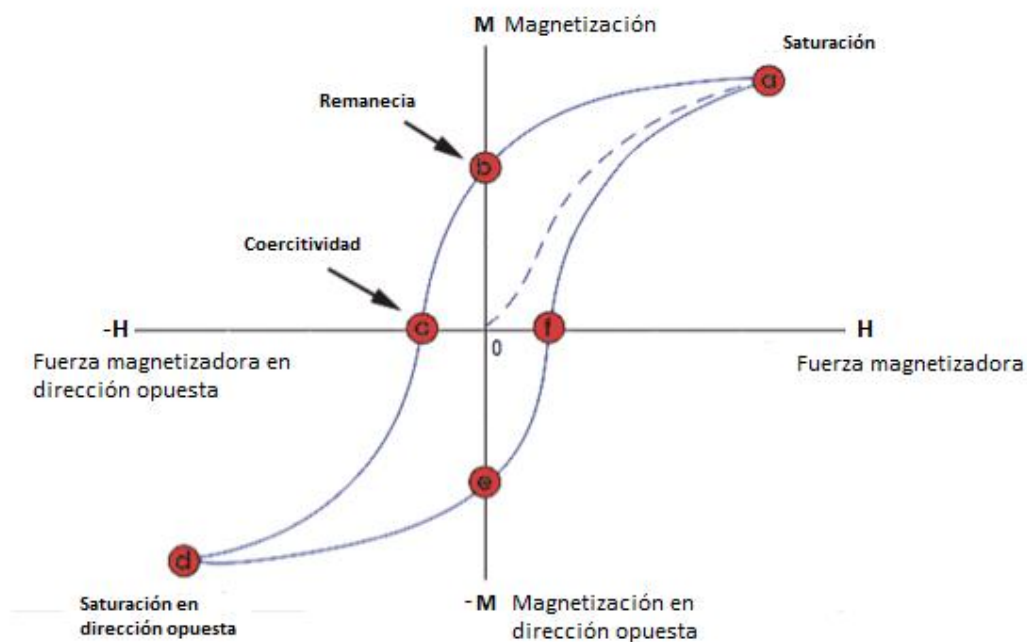


Figura 11.37: Curva de histéresis de un imán.

Inicialmente, en (0), se tiene el material sin magnetizar, $\mathbf{M} = \mathbf{0}$. Cuando se le aplica un campo magnético, aumenta la magnetización del material en el sentido de este. La curva de (0) hasta (a) en el cuadrante I, se denomina "*curva de primera magnetización*". Se observa que la respuesta alcanza un valor máximo, este se denomina "*magnetización de saturación*", y corresponde a todos los momentos magnéticos en su máxima alineación posible. Este parámetro es muy importante porque muestra cuánta magnetización inducida puede tener un imán temporal cuando es excitado.

Al retirar poco a poco el campo desde (a) hasta (b) donde el campo es nulo, \mathbf{M} vuelve por valores mayores que los correspondientes al proceso de magnetización de (0) a (a). Esto se debe al reordenamiento de dominios, y es como si el material conservase capacidad magnética al haber sido sometido a campos superiores.

Esta irreversibilidad de la magnetización se denomina "*histéresis magnética*" del material. En particular, al llegar a (b), en ausencia de campo efectivo, el material queda con magnetización remanente, o remanencia. Este parámetro es muy importante porque muestra cuánta magnetización puede almacenar un imán permanente.

Al aumentar el campo en el sentido opuesto, entre la remanencia (b) y $\mathbf{M} = \mathbf{0}$, punto (c) en el cuadrante II, se tiene la "*curva de desmagnetización*" del material. La intensidad del campo \mathbf{H} requerida para anular \mathbf{M} , se denomina coercitividad intrínseca H_{ci} . Este parámetro es el más importante en un imán, porque representa su resistencia a ser desmagnetizado. También permite estimar cuál es la intensidad de campo necesaria para magnetizar el material.

En función del área encerrada de la curva de histéresis, los materiales se pueden clasificar en:

- Materiales blandos: presentan unas curvas de histéresis muy estrechas y unos valores de saturación elevados, tienen pocas pérdidas por histéresis.
- Materiales duros: estos materiales tienen curvas de histéresis muy grandes y abiertas, por tanto tienen una remanencia y campo coercitivo muy elevado, lo cual les hace muy adecuados para la fabricación de imanes.

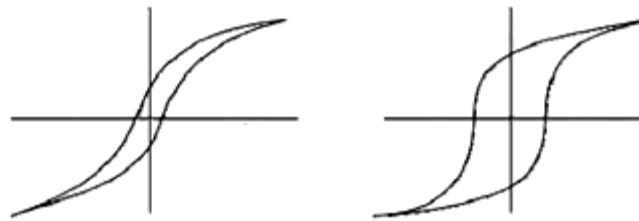


Figura 11.38: Curva de histéresis materiales blandos y duros.

11.4.3. Métodos de desmagnetización.

Para la aplicación en cuestión de los imanes al embrague magnetorreológico, un aspecto muy importante es el mecanismo de magnetización y desmagnetización del imán permanente. Mediante este mecanismo se conseguirían funciones de embragado y desembragado al poder controlar el campo magnético generado por este. Para analizar si es posible incorporar estos componentes como sistema generador de campo magnético, se va a proceder a realizar una breve explicación sobre los dos métodos utilizados para la desimanación de imanes:

- **Temperatura de Curie:** Una forma de desmagnetizar un imán es hacer que su temperatura alcance la temperatura de Curie del material. Por agitación térmica, los dominios quedan desordenados, y en promedio, no hay magnetización neta. Las temperaturas de Curie de los materiales de los imanes más usuales son las siguientes:

Material	Temperatura de Curie
Hierro	760°C
Alcalinos	860°C
Ferritas	450°C
Cobalto	725°C
Neodimio	310°C

Tabla 11.12: Temperaturas de Curie de distintos materiales.

- **Uso de desmagnetizadores:** En este caso, lo que se hace es someter al material a un campo magnético en sentido contrario al producido por el imán permanente, de modo que la estructura de dominios vaya ordenándose consecutivamente, hacia una configuración en promedio sin campo efectivo. Con la aplicación de este campo externo se consigue disminuir la Coercitividad H_{ci} de tal manera que el campo magnético total emitido por el imán sea nulo.

- **Uso de un sistema de apantallamiento:** En este caso, utilizando un elemento aislante o conductor que anule o atraiga el campo magnético generado por el imán, evitando así magnetizar el fluido magnetorreológico.

11.4.4. Uso de imanes permanentes en embrague magnetorreológico

A priori, el uso de imanes permanentes parece una solución muy interesante, especialmente los imanes de neodimio que son los imanes con mayor magnetización.



Figura 11.39: Imán de neodimio con forma de anillo

Sin embargo, presentan un inconveniente que los hacen una solución poco útil y versátil para magnetizar el fluido magnetorreológico del embrague en cuestión.

El reto que presenta la utilización de estos dispositivos en el embrague es la activación y desactivación del campo magnético permanente que poseen dichos imanes. Como se ha visto en el apartado anterior, los mecanismos de desmagnetización que se pueden aplicar no son muy útiles en el embrague magnetorreológico, debido a que al tratarse de un dispositivo portátil destinado para rehabilitación en el cual se busca confort, peso reducido, volumen reducido, bajo nivel de ruido, etc.... calentar los imanes a temperaturas superiores de 300°C o incorporar otro mecanismo para apantallar el efecto magnético del imán no parece la mejor solución.

En definitiva, el embragado y desembragado del dispositivo resultar realmente complicado utilizando imanes permanentes debido al modo de magnetizar y desmagnetizar estos dispositivos, por lo tanto, esta opción se ha descartado como fuente generadora de campo magnético.

Capítulo 12

Conclusiones

12. Conclusiones

Tras haber realizado un largo estudio sobre los problemas que presenta el diseño original del embrague magnetorreológico, se pueden dividir las conclusiones obtenidas en dos campos: por un lado, conclusiones que permiten dar solución a los problemas derivados de la geometría propia del embrague como son las fugas o simplificación del diseño, y por otro lado, conclusiones acerca del sistema a utilizar para generar el campo magnético necesario para modificar las propiedades reológicas del fluido.

12.1. Mejoras geométricas del diseño:

Tras haber realizado analizado en profundidad el problema de fugas que presentaba el embrague y estudiar qué piezas de su composición se podían simplificar, se llegan a las siguientes conclusiones:

- El principal problema de las fugas de aceite a través de los ejes de entrada y salida que tenían como consecuencia perdidas de fluido y filtraciones en los rodamientos ocasionando el bloqueo de las bolas de estos, se solventa cambiando el anillo obturador en V encargado de garantizar la estanqueidad situado en el eje de entrada por otro sello radial con resorte en el labio HMS5 V 19x30x7 del fabricante SKF para asegurar el sellado del embrague.



Figura 12.1: Sello radial con resorte en el labio HMS5 V 19x30x7.

- Como consecuencia a esta solución, ha sido necesario realizar pequeñas modificaciones en los diámetros interiores de la tapa del eje de salida que alberga este componente, debido a que no se encuentran en el mercado sellos radiales con resorte en el labio con las mismas dimensiones que el anillo obturador en V anterior. Este hecho, produce un efecto cadena en los rodamientos que van montados sobre dicha carcasa y la carcasa externa del embrague, viéndose afectadas también algunas de sus dimensiones

Con respecto a los rodamientos, estos han sufrido las siguientes modificaciones:

- Rodamiento 61802, el cual permite el giro relativo entre el eje de entrada y la carcasa de la tapa del eje de salida, va a ser sustituido por otro modelo de rodamiento con protecciones pero conservando las dimensiones originales. El nuevo modelo de rodamiento es 61802-2Z.
- Rodamiento 61800, el cual permite el giro relativo entre el eje de salida y la carcasa superior del embrague, va a ser sustituido por otro modelo de rodamiento con protecciones pero conservando las dimensiones originales. El nuevo modelo de rodamiento es el 61800-2Z.



Figura 12.2: Nuevos rodamientos con tapas de protección.

- El rodamiento 61807, el cual permite el giro relativo entre la tapa del eje de salida y la carcasa superior del embrague, va a sufrir modificaciones geométricas pero se conservará el modelo elegido originalmente. El nuevo rodamiento con mayores dimensiones es el 61808.

Por otro lado, para simplificar la geometría del embrague se ha considerado oportuno eliminar de la carcasa superior y la carcasa inferior los cajeados realizados en su superficie, debido a que no aportan ningún tipo de función estructural y complican el proceso de fabricación, incrementando los costes de fabricación del embrague.

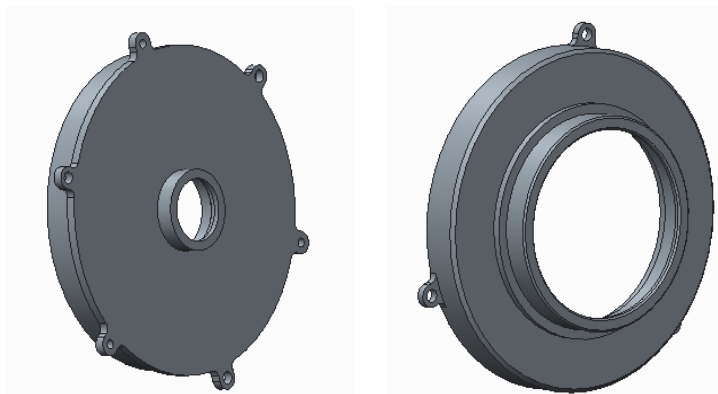


Figura 12.3: Modificaciones en la geometría de las carcasas exteriores.

12.2. Generación de campo magnético

Para generar el campo magnético necesario para modificar las propiedades reológicas del fluido y permitir el embragado y desembragado del dispositivo se han realizado estudios utilizando diferentes dispositivos, llegando a la siguiente conclusión:

- Para generar el campo magnético necesario para transmitir el par de **3,2 N·m** solicitado, la opción más adecuada es utilizar un solenoide, mantener el eje de entrada de hierro y tener en la entrada y en la salida dos superficies de contacto con el fluido.

Por el solenoide debe circular una intensidad de **40.000 A x Vueltas**, que se traduce en un número total de **8000 vueltas** haciendo circular por el cable conductor una intensidad de **5 A**. De esta forma se genera un campo magnético con valor de **0,458 T** para modificar las propiedades reológicas del fluido.

Además, es necesario mantener el actual eje de entrada fabricado de hierro para incrementar la intensidad del campo magnético en el interior del solenoide.

Eje de entrada de hierro y 2 superficies de contacto
$T = 3,2 \text{ N}\cdot\text{m}$
$I = 5 \text{ A}$
Nº de vueltas = 8.000 vueltas
Punto límite de transmisión = 0,0345 m
$\tau_{y,s} = 24,83 \text{ KPa}$
$B = 0,458 \text{ T}$

Tabla 12.1: Punto de diseño utilizando 2 superficies de contacto y eje de entrada de hierro.

Por otra parte, la construcción actual del embrague en el cual hay dos superficies de contacto fluido-disco eje de entrada y fluido-disco eje de salida-tapa eje de salida, permite disminuir el esfuerzo tangencial que es necesario que el fluido transmita, y en consecuencia, disminuye la magnetización necesaria para cambiar las propiedades reológicas de este.

Esta solución no parece muy viable por incompatibilidad con el requerimiento de bajo peso y volumen.

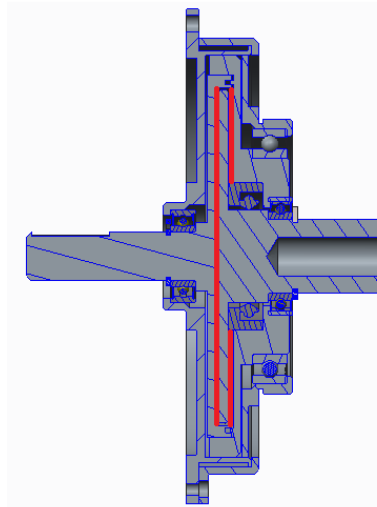


Figura 12.4: Superficies de contacto fluido-embrague.

Por otra parte, las otras dos soluciones que se han estudiado se han descartado por los siguientes motivos:

- **Electroimanes:** El uso de estos dispositivos para la geometría actual del embrague y utilizando 2 o 4 electroimanes diseñados con una superficie de **1 cm²**, no permite transmitir el par requerido debido a la elevada tensión tangencial solicitada a las pequeñas áreas de fluido bajo acción del campo magnético. Se podría incrementar la superficie del electroimán o colocar un mayor número de electroimanes a fin de aumentar la superficie de fluido sobre la que incide el campo magnético pero se vería afectado de forma notoria el requisito de diseñar un dispositivo con el menor peso y tamaño posible al tratarse de un dispositivo portátil para fines de rehabilitación.
- **Imanes permanentes:** El uso de imanes permanentes presenta el problema de desmagnetización y magnetización de estos para poder embragar y desembragar el dispositivo. Los dos sistemas que son posibles utilizar para desmagnetizar son incrementar la temperatura del imán hasta su temperatura de Curie (al menos 300 °C), utilizar otro dispositivo externo que genere un campo magnético en sentido contrario para que neutralice el campo generado por el imán o incorporar otro mecanismo para apantallar el efecto magnético del imán. Estos sistemas para activar o desactivar la generación de campo no son adecuados para implementarlos en un dispositivo portátil de reducido tamaño destinado a tratar problemas de movilidad en humanos.

Capítulo 13

Trabajos futuros

13. Trabajos futuros

Para continuar con la mejora de diseño del embrague magnetorreológico se proponen los siguientes trabajos futuros como líneas de investigación:

- Reconvertir el embrague magnetorreológico de tal manera que las superficies de fricción en contacto con el fluido se encuentren por la superficie lateral en lugar de en el interior de los discos de los ejes de entrada y salida. La siguiente imagen representa un boceto de esta nueva idea que se plantea:

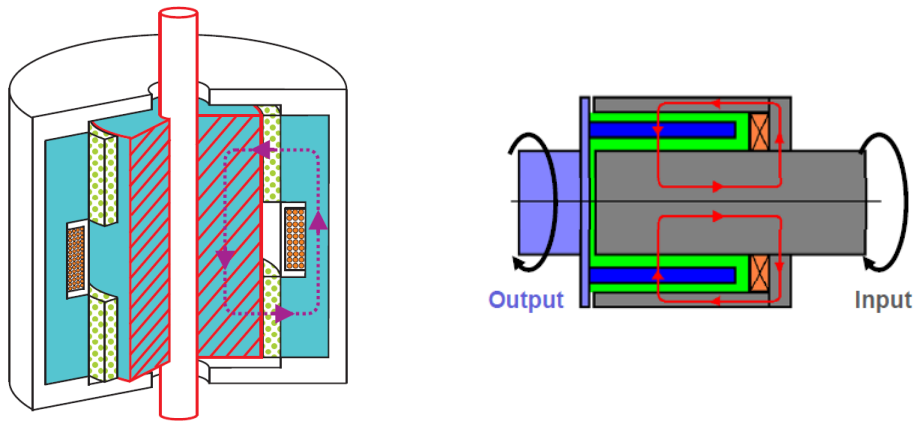


Figura 13.1: Propuestas de nuevo diseño de embrague

De esta manera, se incrementa la superficie de contacto entre el embrague y el fluido magnetorreológico y se podrían utilizar diferentes sistemas de generación de campo que los utilizados hasta ahora.

- Mantener el embrague actual investigando acerca de utilizar como dispositivos generadores de campos magnéticos electroimanes realizados con materiales más ligeros que permitan incrementar la sección útil de estos o aumentar la cantidad que se puede utilizar sin perjudicar la ligereza del dispositivo.
- Estudiar en profundidad la generación del campo magnético utilizando imanes permanentes, tratando de investigar los dispositivos desmagnetizadores existentes en el mercado para poder implementarlos en el embrague.
- Realizar un rediseño del embrague estudiando la posibilidad de incorporar mayor número de discos, aletas o una superficie rugosa a los discos de los ejes de entrada y salida. De esto modo, podría conseguirse un aporte extra de transmisión de par a demás del producido por el esfuerzo cortante al magnetizar el fluido magnetorreológico.

Capítulo 14

Bibliografía

14. Bibliografía

14.1. Páginas o documentos electrónicos en la red

Sistemas de embrague

- [1] http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/maquina-s-iti/Trabajos/Embragues.pdf Accedido en Septiembre 2014

Tipos de fluidos

- [2] <http://marcanord.files.wordpress.com/2012/11/reologc3ada-1.pdf> Accedido en Septiembre 2014

Curvas tipos de fluidos

- [3] http://myrefpoint.blogspot.com.es/2013_02_01_archive.html Accedido en Septiembre 2014

Descripción fluido magnetorreológico

- [4] <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/115833-Propiedades-y-aplicaciones-de-los-fluidos-magnetoreologicos.html> Accedido en Septiembre 2014

Teoría campos magnéticos

- [5] http://webs.ono.com/mariadoloresmarin/PDF/F2b_32_IEM_CM.pdf Accedido en Diciembre de 2015
- [6] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html> Accedido en Diciembre de 2015

Hoja de características fluido magnetorreológico

- [7] <http://www.lordfulfillment.com/upload/DS7012.pdf>

Entorno PTC Creo 2.0

- [8] <http://es.ptc.com/product/creo> Accedido en Noviembre de 2014

Sellos radiales con resorte de SKF:

- [9] <http://www.skf.com/es/products/seals/industrial-seals/power-transmission-seals/radial-shaft-seals/seals-for-general-industrial-applications/hms5-and-hmsa10-seals/index.html> Accedido en Enero de 2015

Tipos de soluciones de sellado para rodamientos

- [10] <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings/sealing-solutions/index.html> Accedido en Enero de 2015

Rodamientos con placas de protección:

- [11] <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings/sealed-bearings/bearings-with-shields/index.html> Accedido en Enero de 2015

Archivos CAD SKF:

- [12] <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row/index.html> Accedido en Enero de 2015

Archivos CAD anillos elásticos

- [13] <http://www.tracepartsonline.net> Accedido en Enero de 2015

Manuales Ansoft Maxwell

- [14] <http://www.mae.ncsu.edu/buckner/courses/mae535/Maxwell3D.pdf> Accedido en Diciembre de 2015
- [15] http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V12.pdf Accedido en Diciembre de 2015

Campo magnético generado en el eje Y de una espira:

- [16] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_magnetico/espira/espira.html#Campo%20magn%C3%A9tico%20producido%20por%20el%20primario Accedido en Diciembre de 2015

Generalidades sobre imanes

- [17] https://www.uam.es/personal_pas/patricio/trabajo/segainvex/electronica/proyectos/curso_instrumentacion/motores_actuadores.pdf Accedido en Febrero de 2015

Curva de histéresis imanes

- [18] <http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=21> Accedido en Febrero de 2015

14.2. Libros

PTC Creo 2.0

[19] Jouni Ahola: 'Creo Parametric Basic Modeling' (Klava Media, Ed.2012)

Campo magnético

[20] Mc Tavish J. P: 'Field pattern of a magnetic dipole' (Am. J. Phys. 68 (6), June 2000)

14.3. Congresos o reuniones

Descripción modelo inicial

[21] Alejandro Martín Clemente, Antonio Flores Caballero, Dolores Blanco Rojas, Dorin-Sabin Copaci and Luis Moreno Lorente.: 'Elbow Functional Compensation using a Lightweight Magnetorheological Clutch'. 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS, Boston, Massachusetts USA, August 30 - September 3, 2011

Anexos

Anexo1. Campo magnético producido por un solenoide en un punto fuera del eje

[16] [20] En primer lugar, se va a calcular el campo magnético producido por una espira circular en un punto fuera de su eje de simetría. La Ley de Biot-Savart afirma que el campo \mathbf{B} producido por una corriente i se obtiene con la siguiente expresión:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi} \oint \frac{\vec{u}_t \times \vec{u}_r}{r^2} d\mathbf{l}$$

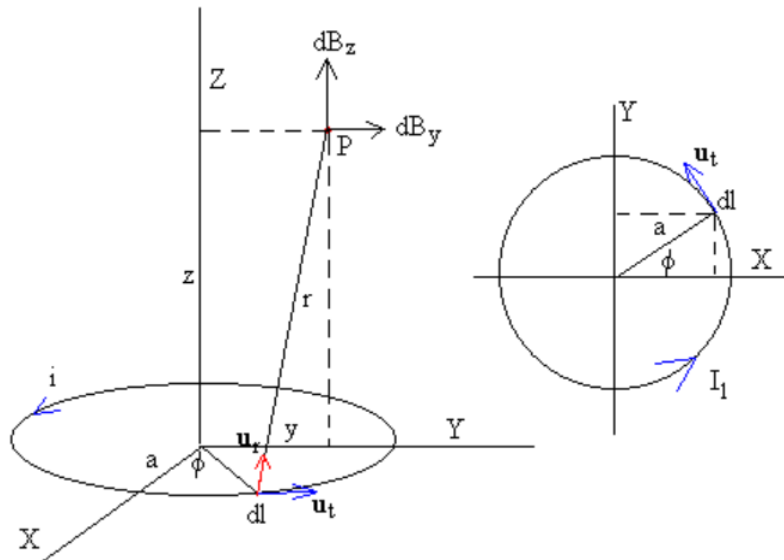
Donde:

$d\mathbf{l}$: Elemento diferencial de corriente.

\vec{u}_t : Vector unitario que señala la dirección y el sentido de la corriente.

\vec{u}_r : Vector unitario que señala el punto P donde se calcula el campo magnético.

En la siguiente figura, se realiza un croquis para aclarar la ecuación anterior:



El campo producido por una espira de radio a tiene simetría axial, bastaría con calcular las componentes B_y y B_z del campo magnético en un punto P (0, y, z) del plano YZ.

Como se puede observar en la figura anterior, la distancia r entre el elemento de corriente $d\mathbf{l} = a \cdot d\Phi$ que está situado en el punto $(a \cdot \cos(\Phi), a \cdot \sin(\Phi), 0)$ y el punto P (0, y, z) considerado es:

$$r = \sqrt{a^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot a \cdot y \cdot \text{sen}(\Phi)}$$

$$\vec{u}_r = \frac{-a \cdot \cos(\Phi) \cdot \vec{i} + (y - a \cdot \text{sen}(\Phi)) \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}}{r}$$

$$\vec{u}_t = -\text{sen}(\Phi) \vec{i} + \cos(\Phi) \vec{j}$$

Efectuando el producto vectorial $\vec{u}_t \times \vec{u}_r$, quedan las siguientes componentes del campo magnético:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \cdot a \cdot z \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\Phi)}{r^3} d\Phi$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \cdot a \cdot z \int_0^{2\pi} \frac{\text{sen}(\Phi)}{r^3} d\Phi$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \cdot a \int_0^{2\pi} \frac{a - y \cdot \text{sen}(\Phi)}{r^3} d\Phi$$

La primera de las integrales es inmediata y vale cero el campo generado $B_x = 0$, ya que para cada elemento de corriente $d\mathbf{l}$ existe otro elemento simétrico al plano OYZ cuyo efecto es el de anular la componente X del campo magnético. Por tanto, las componentes del campo magnético \mathbf{B} sustituyendo los valores de r son:

$$B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i \cdot a \cdot z \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\text{sen}(\Phi)}{(a^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot a \cdot y \cdot \text{sen}(\Phi))^{3/2}} d\Phi$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i \cdot a \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{a - y \cdot \text{sen}(\Phi)}{(a^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot a \cdot y \cdot \text{sen}(\Phi))^{3/2}} d\Phi$$

Debido a la simetría cilíndrica del problema, solamente se tiene dos componentes de campo magnético a lo largo del eje de simetría Z, B_z y la otra en la dirección radial B_y .

Cuando $y = 0$, es decir, se quiere saber el campo magnético generado en un punto del eje de la espira, se puede comprobar rápidamente que $B_y = 0$ y que:

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot i}{2} \frac{a^2}{(z^2 + a^2)^{3/2}}$$

Para expresar estas integrales en términos de las integrales elípticas completas de primera y segunda especie se realiza el cambio de variable:

$$\theta = \frac{\pi}{2 \cdot \Phi}$$

$$b = \frac{a^2 + z^2 + y^2}{2 \cdot a \cdot y}$$

Quedando las ecuaciones de la siguiente manera:

$$B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} i \cdot a \cdot z \int_{\pi}^0 \frac{\cos(\theta)}{(a^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot a \cdot y \cdot \cos(\Phi))^{\frac{3}{2}}} (-d\theta) =$$

$$= -\frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi} \cdot \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{\frac{3}{2}}} \cdot z \int_0^{\pi} \frac{-\cos(\theta)}{(b - \cos(\Phi))^{\frac{3}{2}}} d\theta$$

$$B_z = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i \cdot a \cdot \int_{\pi}^0 \frac{a - y \cdot \cos(\theta)}{(a^2 + y^2 + z^2 - 2 \cdot a \cdot y \cdot \cos(\Phi))^{\frac{3}{2}}} (-d\theta) =$$

$$= \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi} \cdot \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(a \cdot \int_0^{\pi} \frac{d\theta}{(b - \cos(\Phi))^{\frac{3}{2}}} + y \cdot \int_0^{\pi} \frac{-\cos(\theta) \cdot d\theta}{(b - \cos(\Phi))^{\frac{3}{2}}} \right)$$

De las tablas de las integrales elípticas se pueden obtener las siguientes equivalencias:

$$\int_0^{\pi} \frac{d\theta}{(b - \cos(\theta))^{\frac{3}{2}}} = \frac{m}{2 - 2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m)$$

$$\int_0^{\pi} \frac{-\cos(\theta) \cdot d\theta}{(b - \cos(\theta))^{\frac{3}{2}}} = \sqrt{2 \cdot m} \cdot K(m) - \frac{2 - m}{2 - 2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m)$$

Donde:

$$E(m) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - m \cdot \sin^2(\theta)} d\theta$$

$$K(m) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - m \cdot \sin^2(\theta)}}$$

$$m = \frac{2}{1+b}$$

Las componentes del campo magnético se expresan en términos de las integrales elípticas completas de primera $K(m)$ y segunda especie $E(m)$ de la siguiente forma:

$$B_y = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi} \cdot \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{3/2}} \cdot z \cdot \left(-\sqrt{2 \cdot m} \cdot K(m) + \frac{2-m}{2-2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) \right)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi} \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{3/2}} \cdot \left(a \frac{m}{2-2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) + y \cdot \sqrt{2 \cdot m} \cdot K(m) - \frac{2-m}{2-2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) \right)$$

Donde:

$$m = \frac{2}{1+b} = \frac{4 \cdot a \cdot y}{a^2 + z^2 + y^2 + 2 \cdot a \cdot y}$$

Una vez conocidas las expresiones que permiten conocer el campo magnético generado en el interior de la espira en cualquier punto del espacio, se podrá extender al caso de un solenoide intercambiando el valor de la intensidad total i que recorre el hilo por el equivalente número de vueltas de cable conductor que conforman dicho solenoide, multiplicado por la intensidad que circular por el dicho cable conductor ($N \times i$).

$$B_y = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i}{2\pi} \cdot \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{3/2}} \cdot z \cdot \left(-\sqrt{2 \cdot m} \cdot K(m) + \frac{2-m}{2-2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) \right)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i}{2\pi} \frac{a}{(2 \cdot a \cdot y)^{3/2}} \cdot \left(a \frac{m}{2-2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) + y \sqrt{2 \cdot m} \cdot K(m) - \frac{2-m}{2-2 \cdot m} \sqrt{2 \cdot m} \cdot E(m) \right)$$

Resolviendo estas ecuaciones que describen el campo magnético generado en términos de las integrales elípticas por métodos numéricos, se podrá conocer el campo magnético generado en cualquier punto interior de la espira.

Para ello, ha sido elaborado en Matlab un programa que permite resolver dichas ecuaciones y obtener una representación de la función según la coordenada radial. La programación en Matlab de dicho programa puede ser consultada en el Anexo II.

Anexo 2. Programa Matlab para resolver el campo magnético generado por una espira en cualquier punto de su interior.

Con el siguiente programa descrito realizado con Matlab, es posible conocer el campo magnético generado por una espira de corriente en cualquier punto de su interior. Además de esto, obtenemos una representación del campo magnético B a lo largo de la coordenada radial, lo cual es de gran utilidad debido a que uno de los capítulos dedicados a este proyecto consiste en averiguar cuál es el punto de trabajo necesario para poder transmitir el par requerido por el embrague magnetorreológico. La tensión cortante, la cual varía de manera lineal a lo largo de la coordenada lineal, se podrá relacionar con la intensidad de campo magnético B generado gracias a la grafica.

```
%Campo creado por una espira plana, a lo largo de un radio
%(tiene simetría de rotación), en unidades de  $\mu_0/2\pi$ .

clc
clear all

%Variables de entrada
a=input ('radio de la espira (m): ');
i=input('intensidad de corriente por la espira (A): ');

mu=4*pi*10^(-7);%permeabilidad magnética del vacío
Dy=a/100;%Resolución espacial
y=Dy:Dy:a;%coordenada radial
m=4*a.*y./(a^2+y.^2+2*a.*y);

%Resolución integrales elípticas
[K,E]=ellipke(m);
B=(mu*(i*a./(2*pi*(2*a.*y).^(3/2)))*(a.*m.*sqrt(2*m).*E./(2-2*m)+y.*sqrt(2*m).*(K-(2-m).*E./(2-2*m))))';

%Representación grafica B vs r.
plot(y,B)
title('Campo magnético generado por la bobina')
xlabel('Distancia al eje de simetria la bobina [m]')
ylabel('Campo Magnetico B(r) [T]')
legend ('B(r)')
grid on
```

**Anexo 3. Hoja técnica de características fluido magnetorreológico
del fabricante LORD MRF-132DG.**

MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid

Description

LORD MRF-132DG fluid is a hydrocarbon-based magneto-rheological (MR) fluid formulated for general use in controllable, energy-dissipating applications such as shocks, dampers and brakes.

MRF-132DG fluid is a suspension of micron-sized, magnetizable particles in a carrier fluid. When exposed to a magnetic field, the rheology of MRF-132DG fluid reversibly and instantaneously changes from a free-flowing liquid to a semi-solid with controllable yield strength. Altering the strength of the applied magnetic field precisely and proportionally controls the consistency or yield strength of the fluid.

MRF-132DG fluid can be used in *valve mode* (fluid flowing through an orifice) or in *shear mode* (fluid shearing between two surfaces). In the absence of a magnetic field, MRF-132DG fluid flows freely or allows free movement. Upon application of a magnetic field, the fluid's particles align with the direction of the field in chain-like fashion, thereby restricting the fluid's movement within the gap in proportion to the strength of the magnetic field.

Features and Benefits

Fast Response Time – responds instantly and reversibly to changes in a magnetic field.

Dynamic Yield Strength – provides high yield strength in the presence of a magnetic field and very low yield strength in the absence of a magnetic field; allows for a wide range of controllability.

Temperature Resistant – performs consistently throughout a broad temperature range, meeting the requirements of demanding applications such as automotive shock absorbers.

Hard Settling Resistant – provides high resistance to hard settling; easily redispersed.

Non-Abrasive – formulated to not abrade the devices in which the MR fluid is used.

Application

Mixing – Under common flow conditions, no separation is observed between particles and the carrier fluid. However, a degree of separation may eventually occur under static conditions. If needed, use a paint shaker to redisperse the particles into a homogeneous state prior to use.

Storage

Keep container tightly closed when not in use.

Typical Properties*

Appearance	Dark Gray Liquid
Viscosity, Pa-s @ 40°C (104°F) Calculated as slope 800-1200 sec ⁻¹	0.112 ± 0.02
Density	
g/cm ³	2.95-3.15
(lb/gal)	(24.6-26.3)
Solids Content by Weight, %	80.98
Flash Point, °C (°F)	>150 (>302)
Operating Temperature, °C (°F)	-40 to +130 (-40 to +266)

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

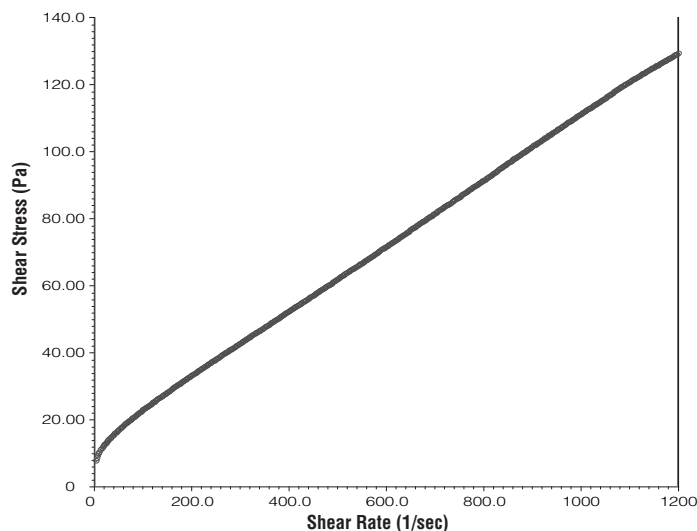
LORD TECHNICAL DATA

Cautionary Information

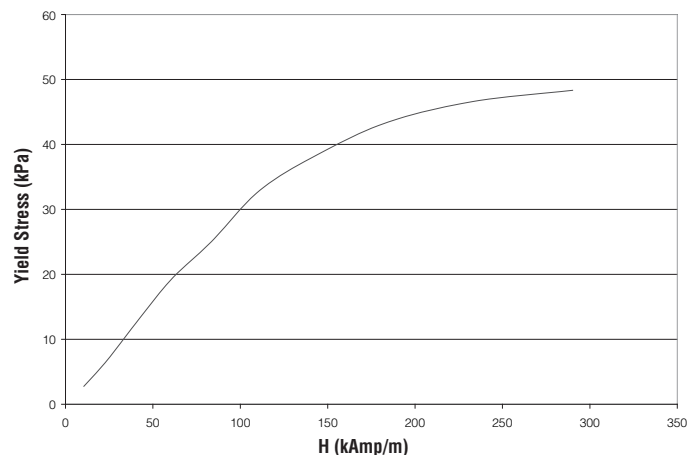
Before using this or any LORD product, refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) and label for safe use and handling instructions.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. Not for consumer use.

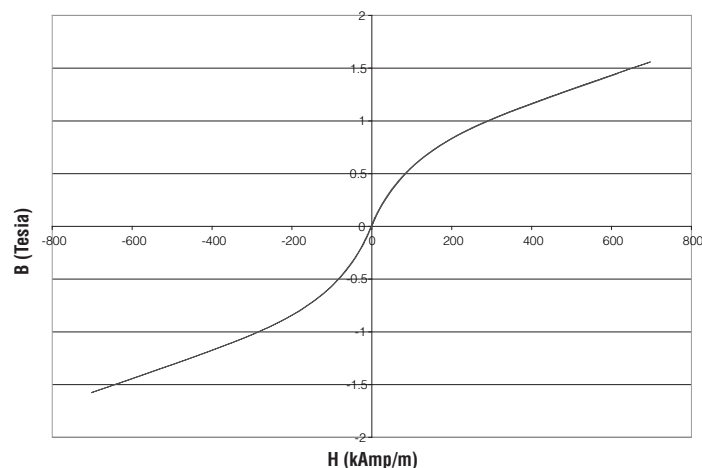
Shear Stress as a function of Shear Rate with no Magnetic Field applied at 40°C (104°F)



Yield Stress vs. Magnetic Field Strength



Typical Magnetic Properties



Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

"Ask Us How" is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide ... Ask Us How.

LORD Corporation World Headquarters

111 Lord Drive
Cary, NC 27511-7923
USA

Customer Support Center (in United States & Canada)

+1 877 ASK LORD (275 5673)

www.lord.com

For a listing of our worldwide locations, visit LORD.com.

Anexo 4. Planos de piezas del embrague modificadas.

CREO PARAMETRIC 2.0

Titulo:

EJE DE ENTRADA

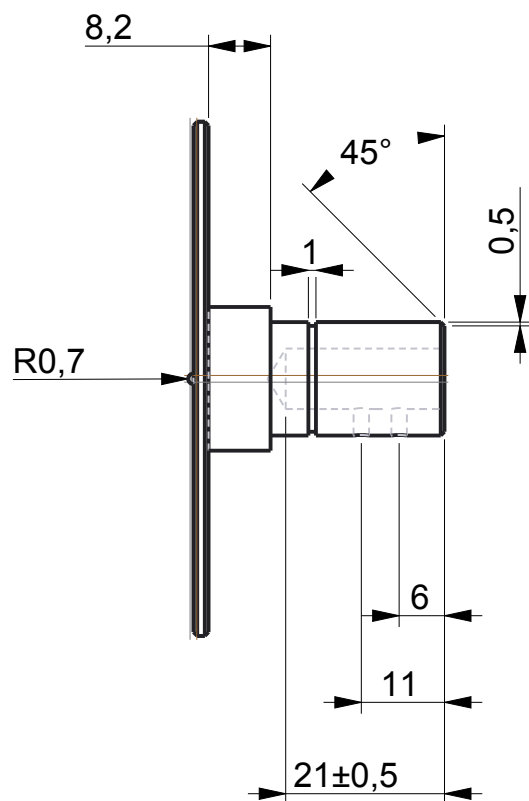
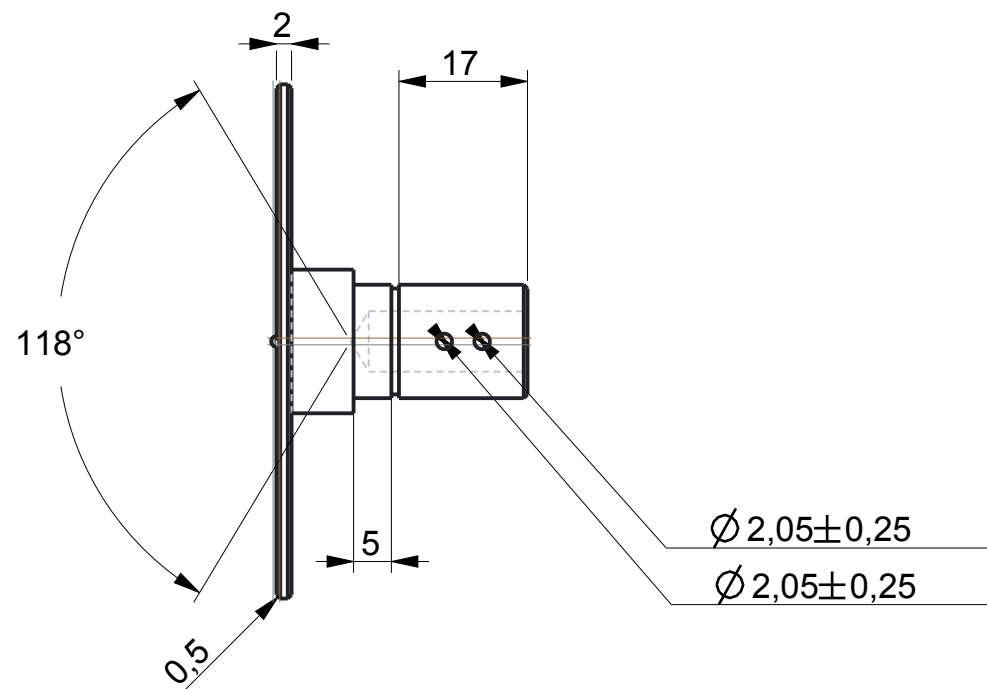
Escala
1:1

Autor:

Alberto Nieto Toledo

Fecha:

Marzo 2015



$\varnothing 2,05 \pm 0,25$

$\varnothing 2,05 \pm 0,25$

$\varnothing 19 \pm 0,25$

$\varnothing 68 \pm 0,25$

$\varnothing 15 \pm 0,25$

$\varnothing 14 \pm 0,25$

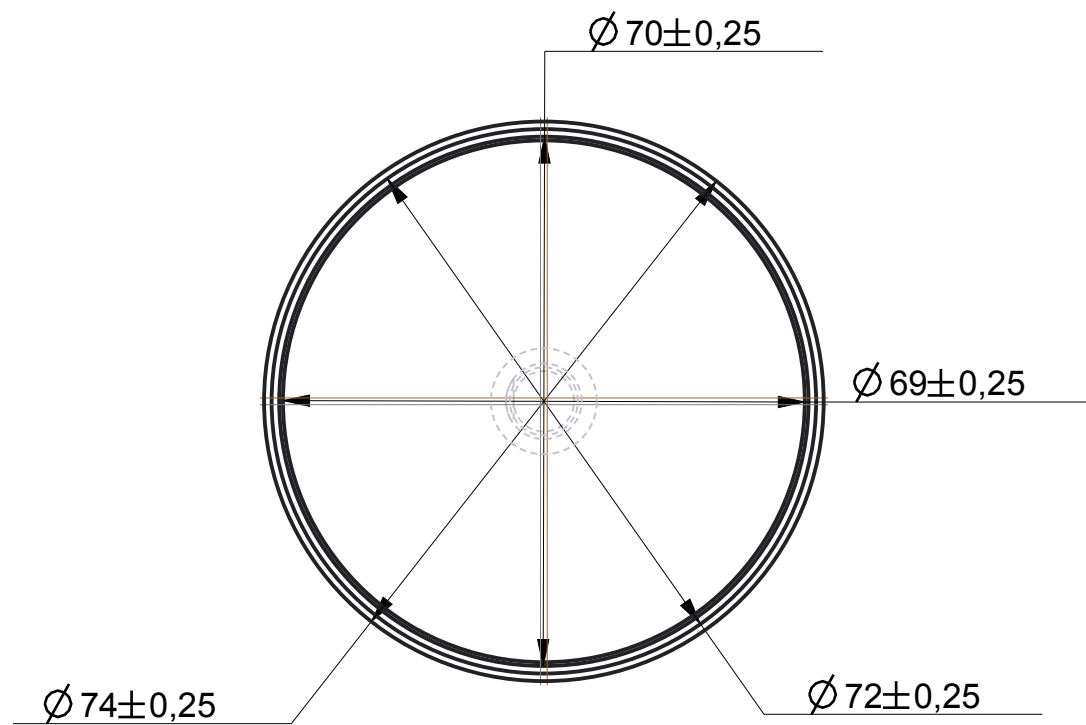
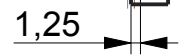
$\varnothing 8 \pm 0,25$

CREO PARAMETRIC 2.0		
Titulo:	EJE DE SALIDA	
Escala 1:1	Autor:	Alberto Nieto Toledo
	Fecha:	Marzo 2015

EJE DE SALIDA

Alberto Nieto Toledo

Marzo 2015

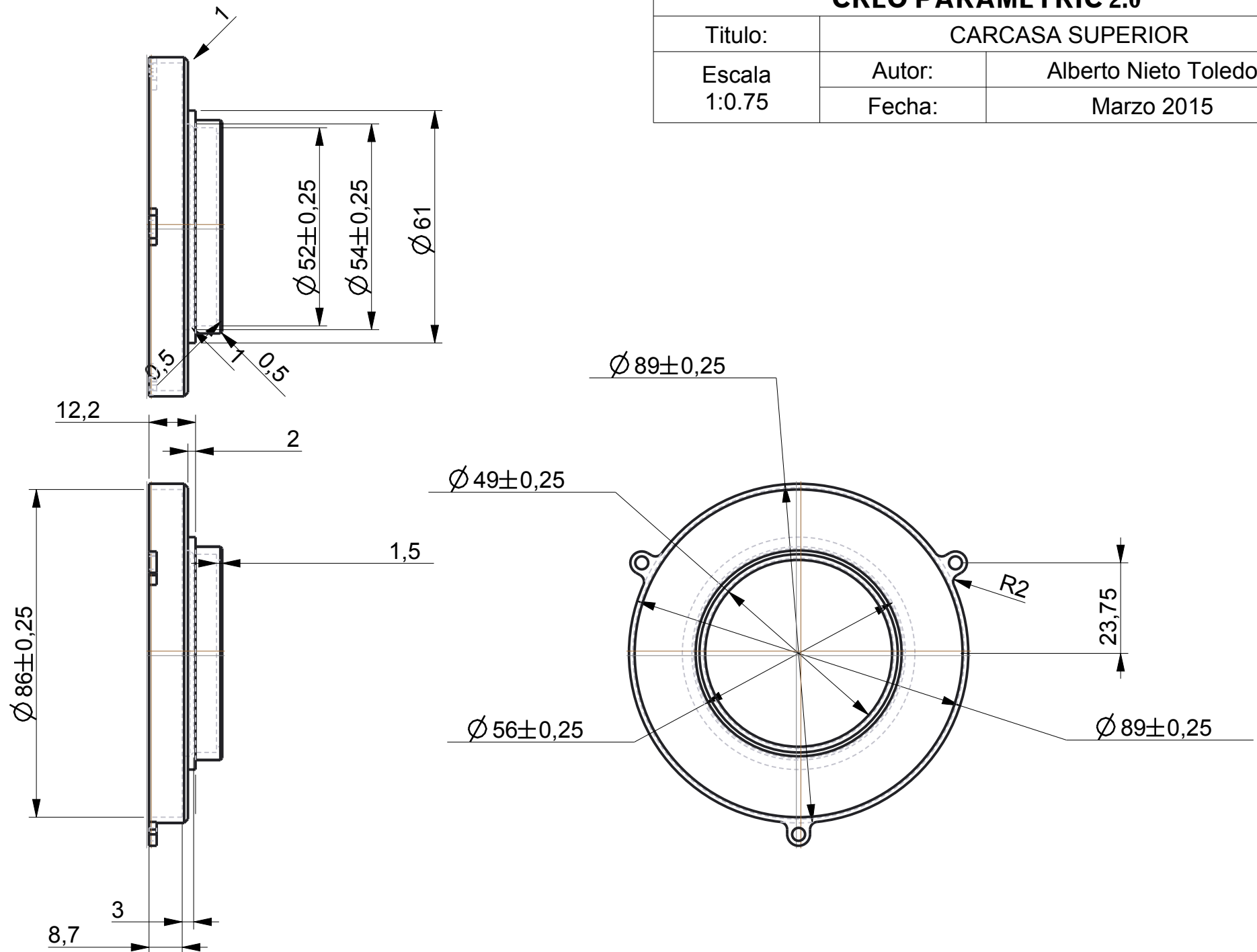


CREO PARAMETRIC 2.0		
Titulo:	CARCASA SUPERIOR	
Escala 1:0.75	Autor:	Alberto Nieto Toledo
	Fecha:	Marzo 2015

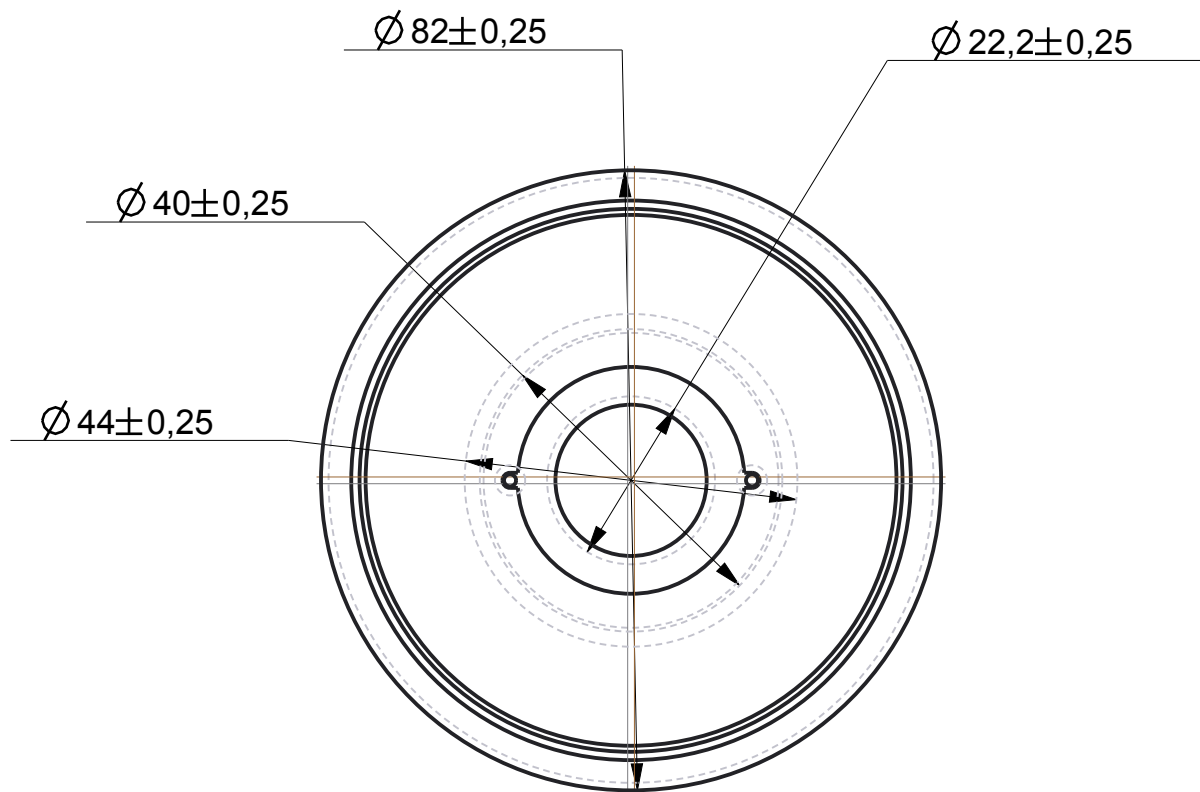
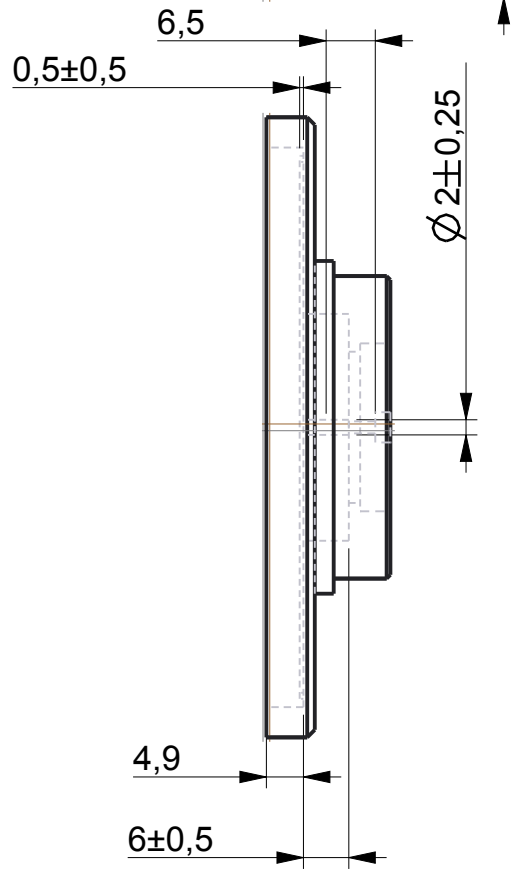
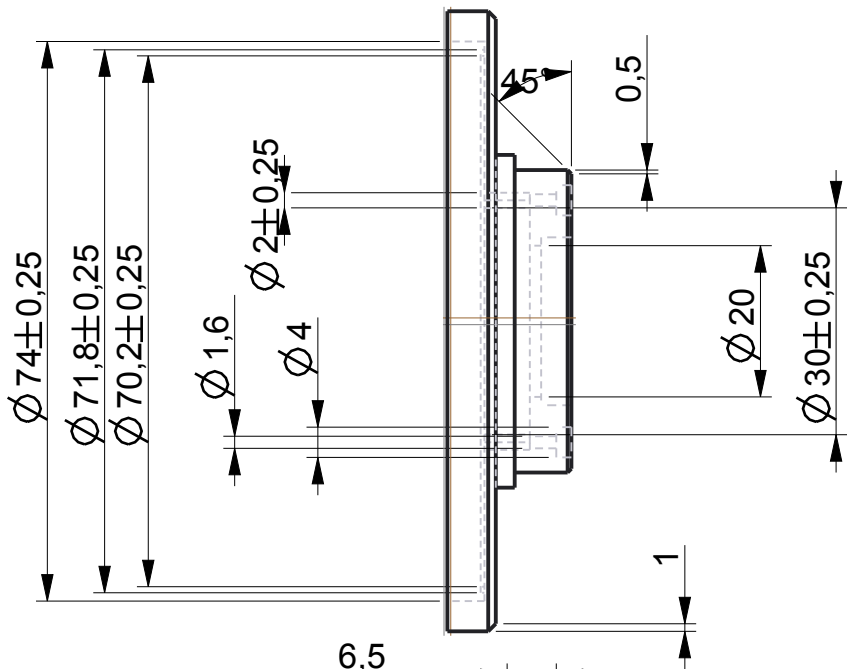
CARCASA SUPERIOR

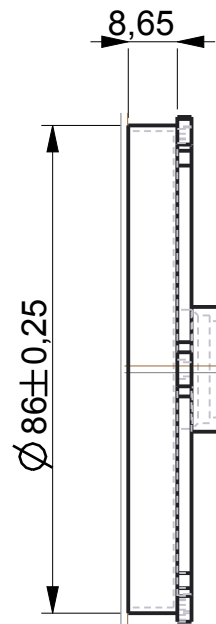
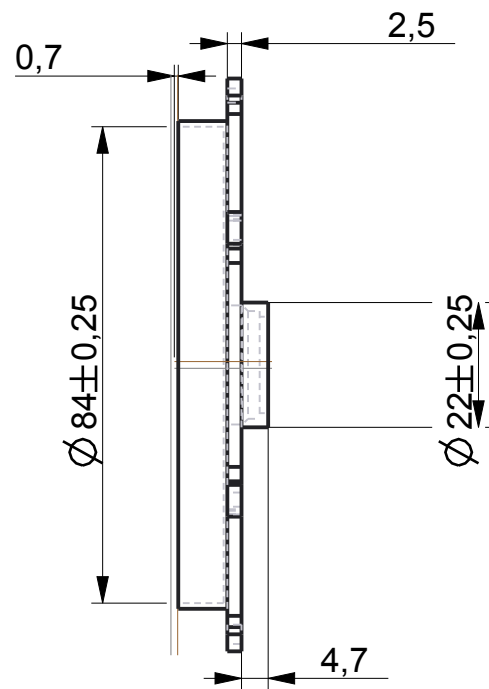
Alberto Nieto Toledo

Marzo 2015



Titulo:	TAPA EJE SALIDA	
Escala 1:1	Autor:	Alberto Nieto Toledo
	Fecha:	Marzo 2015





CREO PARAMETRIC 2.0		
Titulo:	CARCASA INFERIOR	
Escala 1:0.75	Autor:	Alberto Nieto Toledo
	Fecha:	Marzo 2015

